

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа ВВЭР

УДК 621.039.512:621.039.577

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Терешин Иван Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Е.С.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.

P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во

	внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии
Отделение школы Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) _____ (Дата) Бычков П.Н.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврская работа

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Терешин Иван Андреевич

Тема работы:

Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа ВВЭР	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 62-18/с от 02.03.2020 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none"> – тепловая мощность 3000 [МВт]; – ядерное горючее UO_2; – обогащение урана 3,3 %; – температура на входе 131 [°C]; – температура на выходе 208 [°C]; – твэлы стержневые с наружным охлаждением – материалы оболочек твэлов и кассет сплав Э110.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none"> – предварительный расчет; – нейтронно-физический расчет «холодного» и «горячего» состояния реактора; – расчет k_{inf} и длительности кампании в программе WIMS-D5B; – теплофизический расчет ядерного реактора.

Перечень графического материала	<ul style="list-style-type: none"> – презентация; – сборочный чертеж; – спецификация.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Киселева Е.С.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор литературы	
Нейтронно-физический расчет реактора	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	27.04.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф. -м.н.		27.04.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Терешин И.А.		27.04.2020

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Терешину Ивану Андреевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	– стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска; – тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	– 30 % премии; 20 % надбавки; 30 % районный коэффициент.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	– коэффициент отчисления во внебюджетные фонды – 30,2 %;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	– выявить потенциальных потребителей; – произвести анализ конкурентных технических решений; – произвести SWOT-анализ.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	– выявить структуру работ и их исполнителей; – определить трудоемкость проводимых работ; – разработать график проведения исследования; – рассчитать размер бюджета исследования.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	– оценить экономическую эффективность проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>График проведения и бюджет НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	27.04.2020
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	К.Э.Н.		27.04.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Терешин Иван Андреевич		27.04.2020

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А6В	Терешин Иван Андреевич

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа ВВЭР	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: энергетический ядерный реактор водо-водяного типа с тепловой мощностью 3000 МВт.</p> <p>Область применения: ядерная энергетика.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p>Вредные факторы:</p> – отклонение показателей микроклимата; – отсутствие или недостаток естественного освещения; – механические колебания; – акустические колебания; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – повышенный уровень ионизирующих излучений; – психофизиологические факторы. <p>Опасные факторы:</p> – электрический ток.
3. Экологическая безопасность:	– радиоактивное загрязнение атмосферы, гидросферы и литосферы при эксплуатации ядерного реактора; – защита окружающей среды.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– выбор и описание возможных ЧС при разработке ядерного реактора; – анализ типичной ЧС - пожар в рабочем помещении.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	27.04.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		27.04.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А6В	Терешин И.А.		27.04.2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Уровень образования высшее

Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

Период выполнения осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.04.2020	Выдача задания	
04.05.2020	Выбор конструктивной схемы	
12.05.2020	Расчет «холодного» состояния реактора	
18.05.2020	Расчет «горячего» состояния реактора	
22.05.2020	Оценка длительности топливной кампании реактора в программе WIMS-D5B	
29.05.2020	Теплофизический и гидравлический расчет реактора	
08.06.2020	Сдача работы	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 128 с., 16 рис., 24 табл., 38 источников, 9 прил., 1 сборочный чертеж, 1 спецификацию.

Ключевые слова: ядерный реактор, ВВЭР, нейтронно-физический расчет, длительность кампании, нуклидный состав, теплофизический расчет.

Объектом исследования является ядерный реактор типа ВВЭР с тепловой мощностью 3000 МВт.

Цель работы – нейтронно-физический и теплофизический расчет реактора типа ВВЭР, состоящий в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров.

В процессе исследования проводились расчеты нейтронно-физических и теплофизических параметров реактора с использованием известных соотношений и программного обеспечения.

В результате исследования произведен нейтронно-физический расчет с применением одnogруппового метода по известным соотношениям, и с применением многогруппового метода в программе WIMS-D5B.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: реактор типа ВВЭР, тепловая мощность 3000 МВт, ядерное горючее UO_2 , обогащение топлива 3,3 %, теплоноситель вода, температуры теплоносителя на входе и выходе 131 и 208 °С, материал оболочек и кассет: циркониевый сплав $\text{Zr} - 1\% \text{Nb}$.

Степень внедрения: частичная.

Область применения: ядерная энергетика.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

В будущем планируется работать по данной тематике.

Обозначения и сокращения

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

PWR – pressurized water reactor;

ВКУ – внутрикорпусные устройства;

СУЗ – система управления и защиты;

СВРК – система внутриреакторного контроля;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

ТЭР – температурный эффект реактивности;

РБМК – реактор большой мощности канальный;

ЯЭУ – ядерная энергетическая установка;

АЭС – атомная электростанция.

Содержание

Введение.....	17
1 Обзор литературы	18
1.1 Реактор типа ВВЭР	18
1.2 Особенности конструкции реактора ВВЭР	18
1.3 Преимущества и недостатки реактора ВВЭР	21
2 Нейтронно-физический расчет реактора	23
2.1 Предварительный расчет	23
2.2 Расчет концентраций	26
2.3 Гомогенизация	27
2.3.1 Гомогенизация первого вида	28
2.3.2 Гомогенизация второго вида.....	30
2.4 Расчет микроскопических и макроскопических сечений	31
2.4.1 Расчет микроскопических и макроскопических сечений U^{235}	32
2.5 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды	34
2.5.1 Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение	34
2.5.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах	34
2.5.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов	35
2.5.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата	37
2.6 Оптимизация параметров ячейки	38
2.7 Расчет эффективного коэффициента размножения	39
2.8 Расчет параметров стационарного горячего реактора	40
2.8.1 Изменение микроскопических сечений взаимодействий	41
2.8.2 Коэффициент размножения «горячего» реактора	44
2.9 Расчет в программе WIMS-D5B	47

2.9.1 Расчет «холодного» реактора.....	48
2.9.2 Расчет «горячего» реактора	48
2.9.3 Сравнение полученных результатов	54
2.10 Теплофизический расчет реактора	55
2.10.1 Максимальные значения величин	55
2.10.2 Расчет значений q_v , q_l и q_s по высоте наиболее энергонапряженной (центральной) кассеты	57
2.10.3 Расчет температурного состояния теплоносителя по длине топливного канала.....	57
2.10.4 Расчет коэффициентов теплоотдачи с поверхности ТВЭЛ	61
2.10.5 Расчет температурного состояния на поверхности твэла и топливной таблетки.....	63
2.10.6 Распределение температуры по радиусу топливной таблетки.....	65
2.10.7 Гидравлический расчет топливного канала	66
2.10.8 Оценка критических тепловых потоков	69
2.10.9 Расчет термического напряжения в материалах твэлов.....	71
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	75
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования	75
3.2 Анализ конкурентных технических решений	76
3.3 SWOT-анализ.....	78
3.4 Организация и планирование работ	82
3.4.1 Продолжительность этапов работ	83
3.5 Расчёт накопления готовности проекта	86
3.6 Расчёт сметы на выполнение проекта.....	87
3.6.1 Расчёт затрат на материалы	88

3.6.2 Расчёт заработной платы	89
3.6.3 Расчёт затрат на страховые взносы	90
3.6.4 Расчёт затрат на электроэнергию	90
3.6.5 Расчёт амортизационных расходов	91
3.6.6 Расчёт прочих расходов.....	92
3.6.7 Расчёт суммарной себестоимости разработки	93
3.6.8 Расчёт прибыли	93
3.6.9 Расчёт НДС	94
3.6.10 Цена разработки проекта.....	94
3.6.11 Оценка экономической эффективности проекта	94
4 Социальная ответственность	96
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	96
4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	97
4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	97
4.2 Производственная безопасность.....	99
4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте исследователя.....	99
4.2.2 Мероприятия по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	102
4.3 Экологическая безопасность.....	104
4.3.1 Анализ влияния ядерного реактора на окружающую среду	104
4.3.2 Мероприятия по защите окружающей среды	105
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	105

4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований	106
4.4.2 Мероприятия по предотвращению ЧС.....	106
Заключение	109
Список использованных источников	110
Приложение А	115
Приложение Б.....	117
Приложение В.....	118
Приложение Г	121
Приложение Д.....	122
Приложение Е.....	125
Приложение Ж.....	126
Приложение З	127
Приложение И	128

Введение

Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) в настоящее время являются самым массовым типом реактора, используемым для промышленного производства тепловой энергии и электроэнергии. В связи с этим возникает необходимость проведения нейтронно-физического и теплофизического расчетов с целью обоснования возможности проектирования и безопасной эксплуатации реактора с заданными характеристиками.

Цель данной работы: нейтронно-физический и теплофизический расчет реактора типа ВВЭР, состоящий в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющей поставленным требованиям.

Задачи:

- проведение предварительного теплофизического расчета реактора;
- «холодный» расчет коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде;
- оптимизация параметров ячейки;
- определение эффективного коэффициента размножения нейтронов;
- расчет «горячего» реактора при номинальных значениях температур материалов;
- расчет длины кампании реактора с использованием программного комплекса WIMS-D5B;
- обоснование конструкции реактора в ходе теплофизического и гидравлического расчетов.

1 Обзор литературы

Водо-водяные ядерные реакторы получили широкое распространение в области промышленного производства электрической и тепловой энергии. В России данный тип реактора представлен серией реакторов ВВЭР. Иностранном аналогом отечественным реакторам являются реакторы типа PWR (Pressurized Water Reactor). На 2018 год в мире эксплуатировалось 298 водо-водяных реакторов, из которых 20 – реакторы ВВЭР, эксплуатируемые в России и обеспечивающие суммарную мощность 16578 МВт [1].

1.1 Реактор типа ВВЭР

ВВЭР – энергетический реактор водо-водяной под давлением, корпусной, на тепловых нейтронах, разработанный и эксплуатируемый на территории России. Теплоносителем первого контура и замедлителем нейтронов является обычная вода под давлением. Теплоносителем второго контура является пароводяная смесь.

Наибольшее распространение в России получил реактор ВВЭР-1000, относящийся к поколениям III и III+ [2].

1.2 Особенности конструкции реактора ВВЭР

Общий вид реактора в сборе представлен на рисунке 1.2 [3].

Корпус реактора представляет собой вертикальный цилиндр с приваренным к нему эллиптическим днищем, внутри которого располагаются ВКУ и активная зона. Корпус состоит из фланца, зоны патрубков, опорной обечайки, цилиндрической части и эллиптического днища.

В верхней части корпуса находятся патрубки для подвода и отвода теплоносителя и патрубки для аварийного подвода теплоносителя. Основные патрубки расположены в два ряда по вертикали, что позволяет использовать схему циркуляции теплоносителя с разделением потоков сплошной кольцевой перегородкой.

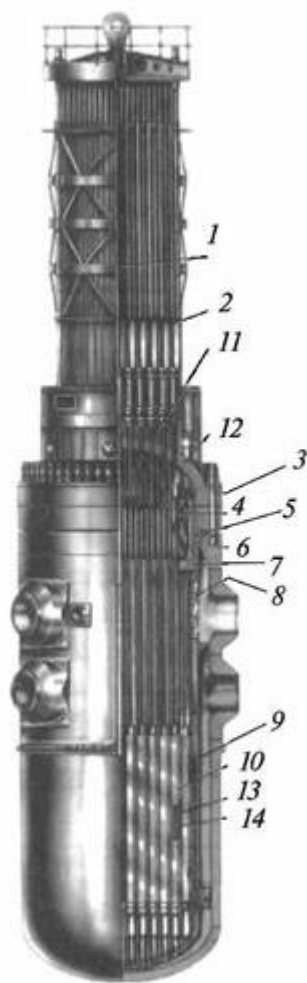


Рисунок 1.1 – Реактор ВВЭР-1000 в сборе: 1 – верхний блок; 2 – привод СУЗ; 3 – шпилька; 4 – труба для загрузки образцов-свидетелей; 5 – уплотнение; 6 – корпус реактора; 7 – блок защитных труб; 8 – шахта; 9 – выгородка активной зоны; 10 – топливные сборки; 11 – теплоизоляция реактора; 12 – крышка реактора; 13 – регулирующие стержни; 14 – топливные стержни

На внутренней поверхности фланца предусмотрен бурт для установки шахты реактора. На верхнем торце фланца размещены резьбовые гнезда для размещения шпилек главного разъема, а также кольцевые канавки для размещения уплотнительных прокладок. Контактные поверхности корпуса реактора имеют антикоррозионную наплавку толщиной 15 мм. На остальной поверхности толщина наплавки составляет 7-9 мм [3].

Верхний блок реактора предназначен для размещения органов системы управления и защиты и создания замкнутого объема давления. Конструкционно

он состоит из крышки с патрубками и траверсой, установленных приводов СУЗ, выводов разъемов каналов контрольных измерений и температурного контроля.

Крышка реактора предназначена для уплотнения реактора, размещения приводов шаговых электромеханизмов, выводов коммуникаций СВРК, удержания от всплытия активной зоны, блока защитных труб и шахты реактора.

Шахта и выгородка реактора предназначены для разделения потоков теплоносителя и защиты металла корпуса реактора от воздействия нейтронного и γ -излучений. Одновременно они входят в состав железобетонного отражателя.

Конструктивно шахта представляет собой обечайку с фланцем и эллиптическим днищем, в котором закрепляются опорные трубы, образующие опорную плиту для установки и дистанционирования кассет активной зоны. Снаружи на фланце имеются 12 пазов для ориентации ее по углу в плане.

Выгородка предназначена для формирования активной зоны и дистанционирования периферийных топливных кассет. Она представляет собой обечайку, составленную из скрепленных между собою шпильками и штифтами колец, имеющих внутреннюю конфигурацию повторяющую форму активной зоны. Ориентация и фиксация выгородки в шахте реактора осуществляется с использованием шести труб с резьбой в нижней части, а также трех фиксаторов, устанавливаемых в граненом поясе шахты.

Блок защитных труб предназначен для дистанционирования и фиксации головок ТВС, удержание их от всплытия, защиты штанг приводов СУЗ от воздействия потока теплоносителя, разводка направляющих каналов СВРК, обеспечения равномерного выхода теплоносителя по сечению активной зоны [3].

Активная зона реактора собрана из ТВС шестигранной формы с расположением твэлов диаметром 9,1 мм по треугольной решетке с шагом 12,75 мм. Каждая ТВС состоит из 312 твэлов, 18 направляющих каналов и 15 дистанционирующих решеток. Твэл состоит из оболочки, заглушек, таблеток спеченного диоксида урана и фиксатора [4]. Материалом оболочки и заглушек является циркониевый сплав Zr – 1 % Nb (сплав Э110). Пространство между

оболочкой и топливной таблеткой заполнено гелием для обеспечения теплообмена.

1.3 Преимущества и недостатки реактора ВВЭР

Преимущества и недостатки ядерного реактора типа ВВЭР обуславливаются как конструкцией реактора, так и свойствами используемых в нем материалов.

Применение железноводного отражателя позволяет снизить воздействие радиации на корпус реактора и обеспечить продление его ресурса. Использование двухконтурной схемы обеспечивает невозможность загрязнения турбины и конденсатора и удержание радиоактивных материалов в пределах защитной оболочки, что позволяет предотвратить их выход в окружающую среду [5]

Вследствие использования обычной воды в качестве замедлителя ВВЭР имеет следующие важные достоинства:

- возможность использования воды в качестве и замедлителя, и теплоносителя;
- доступность и большой опыт использования технологии воды;
- возможность получения больших удельной и объемной мощностей при относительно небольших габаритах и умеренных критических нагрузках реактора;
- высокая замедляющая способность воды в сочетании со слабым рассеянием нейтронов водородом при больших энергиях позволяет обеспечить глубокое выгорание при умеренных обогащениях топлива;
- уменьшение плотности воды с повышением температуры обеспечивает высокую степень внутренней устойчивости благодаря отрицательному плотностному коэффициенту реактивности.

Вместе с тем ВВЭР обладают недостатками, обусловленными применением воды в качестве теплоносителя и замедлителя:

- большое сечение поглощения нейтронов водой, что приводит к необходимости использования обогащенного топлива [6];

- высокое давление теплоносителя первого контура, поддерживаемое с целью предотвращения кипения при достижении энергетически приемлемых температур;

- коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом теплоносителя, что заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы;

- ограничение тепловых потоков кризисом теплосъема [7].

Циркониевые сплавы обладают высокой прочностью, теплопроводностью, коррозионной и радиационной устойчивостью. Однако в случае аварии с потерей теплоносителя и перегревом топливных элементов происходит пароциркониевая реакция, в ходе которой выделяется водород, что может привести к взрыву [8].

Керамическое топливо из диоксида урана обладает следующими преимуществами:

- высокая температура плавления (2800 °C);

- высокая плотность делящегося материала;

- химическая инертность;

- высокая радиационная стойкость.

Основными недостатками данного вида топлива являются низкая теплопроводность и высокая хрупкость материала, что может приводить к растрескиванию топливных таблеток и выходу продуктов деления в объем оболочки тепловыделяющего элемента [9,10].

2 Нейтронно-физический расчет реактора

2.1 Предварительный расчет

Для расчета нейтронно-физических параметров реактора на тепловых нейтронах требовалось определить размеры активной зоны данного реактора для обеспечения нужного теплосъема при заданной мощности аппарата. Все необходимые величины для расчета указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Рабочие параметры реактора

Тепловая мощность, МВт	N	3000
Удельная мощность, кВт/л	$\overline{N_0}$	90
Отношение высоты к диаметру	m	1
Коэффициент увеличения объема АЗ за счет СУЗ	η	1,1
Объемный коэффициент неравномерности	k_v	2,3
Осевой коэффициент неравномерности	k_z	1,3
Размер элементарной ячейки под ключ, см	$h_{яч}$	1,276
Внешний диаметр твэла, см	$D_{твэл}$	0,91

Исходя из требуемой мощности реактора, размеры активной зоны оценены по следующим формулам:

$$V_{АкЗ} = \frac{N}{\overline{N_0}} \cdot \eta, [м^3]; \quad (2.1)$$

$$D_{АкЗ} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{АкЗ}}{\pi \cdot m}}, [м]; \quad (2.2)$$

$$H_{АкЗ} = m \cdot D_{АкЗ}, [м], \quad (2.3)$$

где $V_{АкЗ}, D_{АкЗ}, H_{АкЗ}$ – объем, диаметр и высота активной зоны;

m – отношение высоты к диаметру;

N – заданная тепловая мощность реактора, МВт;

η – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора;

$\overline{N_0}$ – средняя удельная объемная нагрузка, кВт/л.

Вследствие размещения регулирующих стержней СУЗ максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \overline{N_0} \cdot k_v, \text{ [кВт/л]}, \quad (2.4)$$

где k_v – объемный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0_{\max}} \cdot S_{яч}}{116 \cdot \Pi_0 \cdot n}, \text{ [Гкал/м}^2 \cdot \text{ч]}, \quad (2.5)$$

где Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛ, см²;

$S_{яч}$ – площадь сечения элементарной ячейки, см²;

n – число ТВЭЛов в элементарной ячейке.

Необходимая для отвода тепла скорость прокачки теплоносителя определялась в максимально напряженном тепловыделяющем элементе из следующего выражения:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{АкЗ}}{3,6 \cdot k_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{mn}}, \text{ [м/с]}, \quad (2.6)$$

где k_z – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

S_{mn} – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один ТВЭЛ, см²;

ρ – плотность теплоносителя при рабочих параметрах, г/см³;

Δi – разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе, ккал/кг.

Данная величина находилась по следующей формуле:

$$\Delta i = C_p \cdot (t_{вых} - t_{вх}), \text{ [ккал/кг]}, \quad (2.7)$$

где C_p – теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, ккал/(кг·градус);

$t_{вх}, t_{вых}$ – температура теплоносителя на входе и выходе, °С.

Объем активной зоны:

$$V_{АкЗ} = \frac{N}{N_0} \cdot \eta = \frac{3000}{90} \cdot 11 = 36,67 \text{ м}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{АкЗ} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{АкЗ}}{\pi \cdot m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 36,67}{3,14 \cdot 1}} = 3,6 \text{ м} = 360 \text{ см}.$$

Высота активной зоны:

$$H_{АкЗ} = m \cdot D_{АкЗ} = 1 \cdot 3,6 = 3,6 \text{ м} = 360 \text{ см}.$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \overline{N_0} \cdot k_V = 90 \cdot 2,3 = 207 \text{ кВт/л}.$$

Площадь сечения элементарной ячейки:

$$S_{яч} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{h_{яч}}{2} \right)^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{1,276}{2} \right)^2 = 1,41 \text{ см}^2.$$

Периметр тепловыделяющей поверхности твэла:

$$\Pi_0 = \pi \cdot D_{твэл} = 3,14 \cdot 0,91 = 2,859 \text{ см}.$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0_{\max}} \cdot S_{яч}}{116 \cdot \Pi_0 \cdot n} = \frac{207 \cdot 1,41}{116 \cdot 2,859 \cdot 1} = 0,88 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч} = 1,023 \text{ МВт/м}^2.$$

Площадь сечения твэла:

$$S_{твэл} = \pi \cdot \frac{D_{твэл}^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,91^2}{4} = 0,65 \text{ см}^2.$$

При параметрах теплоносителя $t = 169,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $P = 15,7 \text{ МПа}$, $\rho = 0,907 \text{ г/см}^3$ и $C_p = 1,02946 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{градус)} = 4,310 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{градус)}$:

$$\Delta i = C_p \cdot (t_{\text{вх}} - t_{\text{вх}}) = 1,02946 \cdot (208 - 131) = 79,268 \text{ ккал/кг} = 331,879 \text{ кДж/кг}.$$

Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на 1 твэл:

$$S_{\text{тн}} = S_{яч} - S_{твэл} = 1,41 - 0,65 = 0,76 \text{ см}^2.$$

Скорость прокачки теплоносителя:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{АкЗ}}{3,6 \cdot k_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{тн}}} = \frac{0,88 \cdot 2,859 \cdot 360}{3,6 \cdot 1,3 \cdot 0,907 \cdot 79,268 \cdot 0,76} = 3,549 \text{ м/с}.$$

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяла установленным требованиям ($v < 10$ м/с – для реакторов типа ВВЭР).

2.2 Расчет концентраций

Поскольку ячейка реактора состояла из нескольких зон с различными ядерными свойствами, было необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, коэффициенты диффузии, замедляющие свойства) для каждой зоны; оболочка – сплав Zr – 99%, Nb – 1%, теплоноситель и замедлитель – легкая вода.

Вычисление ядерных концентраций производилось для каждого элемента активной зоны и отражателя. Ядерная концентрация находилась по формуле:

$$N = \frac{N_A \cdot \rho}{A}, \text{ [ядер/см}^3\text{]}, \quad (2.8)$$

где ρ – плотность вещества, г/см³ [11];

N_A – число Авагадро, моль⁻¹;

A – атомная масса элемента, г/моль.

Топливом являлась двуокись урана (UO₂), обогащенная по U²³⁵ на 3,3 %, поэтому ядерная концентрация топлива рассчитывалась следующим образом:

$$N_{UO_2} = \frac{N_A \cdot \rho_{UO_2}}{A_{UO_2}} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 10,4}{270} = 2,319 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3.$$

Расчет концентрации отдельных элементов, входящих в состав топлива, осуществлялся следующим образом:

$$N_{U^{235}} = C_{U^{235}} \cdot N_{UO_2} = 0,033 \cdot 2,319 \cdot 10^{22} = 7,656 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{U^{238}} = (1 - C_{U^{235}}) \cdot N_{UO_2} = (1 - 0,033) \cdot 2,319 \cdot 10^{22} = 2,243 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_O(mon) = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 2,319 \cdot 10^{22} = 4,638 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Теплоносителем в данном ядерном реакторе служила вода:

$$N_{H_2O} = \frac{N_A \cdot \rho_{H_2O}}{A_{H_2O}} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1}{18} = 3,346 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3;$$

$$N_H = 2 \cdot N_{H_2O} = 2 \cdot 3,346 \cdot 10^{22} = 6,692 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_O(mn) = N_{H_2O} = 3,346 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

В качестве оболочки твэла использовался циркониевый сплав Zr – 99%, Nb – 1%. Соответственно, рассчитывались концентрации каждой компоненты, входившей в состав сплава:

$$N_{Zr} = C_{Zr} \cdot \frac{N_A \cdot \rho_{сплава}}{A_{Zr}} = 0,99 \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,509}{91} = 4,265 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Nb} = C_{Nb} \cdot \frac{N_A \cdot \rho_{сплава}}{A_{Nb}} = 0,01 \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,509}{93} = 4,216 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3.$$

Концентрация гелия, закачиваемого в тэвл:

$$N_{He} = \frac{N_A \cdot \rho_{He}}{A_{He}} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,00017846}{4} = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ ядер/см}^3.$$

2.3 Гомогенизация

Гетерогенная элементарная ячейка данного реактора изображена на рисунке 2.1, где горизонтальной штриховкой обозначен замедлитель теплоноситель, заштрихованная окружность большего диаметра – оболочка твэла, центральным отверстием – гелий, заштрихованная окружность меньшего диаметра – топливо (UO_2).

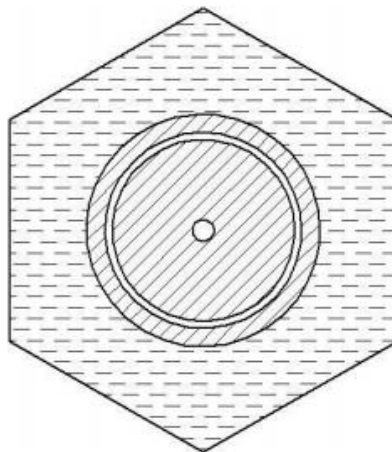


Рисунок 2.1 – Гетерогенная элементарная ячейка

Для упрощения расчета было необходимо провести гомогенизацию данной ячейки двумя способами.

Для проведения гомогенизации были приняты геометрические величины, указанные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения геометрических величин элементов элементарной ячейки

Геометрическая величина	Размер
Внешний радиус твэла (оболочки)	$R_{твэл} = 0,455 \text{ см};$
Внутренний радиус оболочки	$r_{твэл} = 0,39 \text{ см};$
Внешний радиус топливной таблетки	$R_{тон} = 0,3765 \text{ см};$
Внутренний радиус топливной таблетки	$r_{тон} = 0,07 \text{ см};$
Площадь сечения твэла	$S_{твэл} = 0,65 \text{ см}^2;$
Площадь сечения замедлителя-теплоносителя	$S_{тн} = 0,76 \text{ см}^2;$
Площадь сечения ячейки	$S_{яч} = 1,41 \text{ см}^2.$

2.3.1 Гомогенизация первого вида

В данном случае было необходимо представить элементарную ячейку в виде однородной гомогенизированной смеси. Эскиз данной ячейки изображен на рисунке 2.2, где обозначена гомогенизированная смесь элементов, входящих в ячейку.

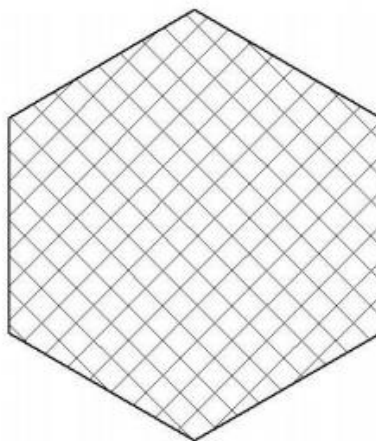


Рисунок 2.2 – Элементарная ячейка после гомогенизации первого вида

Ядерные концентрации гомогенизированных элементов находились по следующей формуле:

$$N_i^{z1} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{яч}}, [\text{ядер/см}^3], \quad (2.9)$$

где N_i – гетерогенная ядерная концентрация i -го элемента, ядер/см³;

S_i – площадь сечения i -го элемента в элементарной ячейке, ядер/см³.

Рассчитывались площади сечения недостающих элементов:

$$S_{mon} = \pi \cdot (R_{mon}^2 - r_{mon}^2) = 3,14 \cdot (0,3765^2 - 0,07^2) = 0,43 \text{ см}^2;$$

$$S_{об} = \pi \cdot (R_{мвэл}^2 - r_{мвэл}^2) = 3,14 \cdot (0,455^2 - 0,39^2) = 0,173 \text{ см}^2;$$

$$S_{He} = \pi \cdot (r_{мвэл}^2 - R_{mon}^2 + r_{mon}^2) = 3,14 \cdot (0,39^2 - 0,3765^2 + 0,07^2) = 0,048 \text{ см}^2.$$

Соответственно, ядерные концентрации после гомогенизации равны:

$$N_{U^{235}}^{z1} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{mon}}{S_{яч}} = \frac{7,556 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{1,41} = 2,334 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{U^{238}}^{z1} = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{mon}}{S_{яч}} = \frac{2,243 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,41} = 6,840 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_O^{z1}(mon) = \frac{N_O(mon) \cdot S_{mon}}{S_{яч}} = \frac{4,639 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,41} = 1,415 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_H^{z1} = \frac{N_H \cdot S_{mn}}{S_{яч}} = \frac{6,692 \cdot 10^{22} \cdot 0,76}{1,41} = 3,605 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_O^{z1}(mn) = \frac{N_O(mn) \cdot S_{mn}}{S_{яч}} = \frac{3,346 \cdot 10^{22} \cdot 0,76}{1,41} = 1,8 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Zr}^{z1} = \frac{N_{Zr} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = \frac{4,265 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{1,41} = 5,254 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Nb}^{z1} = \frac{N_{Nb} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = \frac{4,216 \cdot 10^{20} \cdot 0,173}{1,41} = 5,193 \cdot 10^{19} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{He}^{z1} = \frac{N_{He} \cdot S_{He}}{S_{яч}} = \frac{2,687 \cdot 10^{19} \cdot 0,048}{1,41} = 9,129 \cdot 10^{17} \text{ ядер/см}^3.$$

2.3.2 Гомогенизация второго вида

В данном случае было необходимо разделить гетерогенную элементарную ячейку на две гомогенизированные зоны: замедлитель-теплоноситель и фиктивный блок. Эскиз данной ячейки изображен на рисунке 2.3, где горизонтальной штриховкой обозначен замедлитель-теплоноситель, окружностью меньшего диаметра отмечена гомогенизированная смесь элементов твэла.

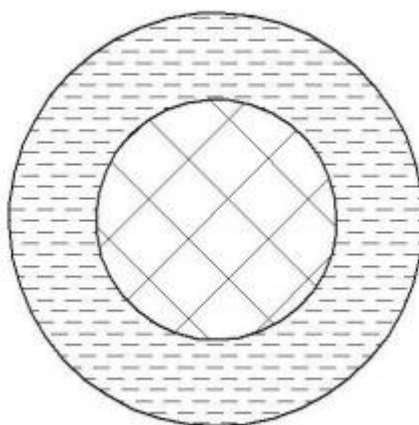


Рисунок 2.3 – Элементарная ячейка после гомогенизации второго вида

Ядерные концентрации элементов замедлителя-теплоносителя остались неизменными, по сравнению, с гетерогенной ячейкой, так как:

$$N_i^{e2} = \frac{N_i \cdot S_{mn}}{S_{mn}} = N_i, [\text{ядер/см}^3]. \quad (2.10)$$

Соответственно:

$$N_H^{e2} = N_H = 6,692 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_O^{e2}(mn) = N_O(mn) = 3,346 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Ядерные концентрации элементов твэла рассчитывались по следующей формуле:

$$N_i^{e2} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{твэл}}, [\text{ядер/см}^3]. \quad (2.11)$$

Тогда:

$$N_{U^{235}}^{e2} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{mon}}{S_{твэл}} = \frac{7,656 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{0,65} = 5,061 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{U^{238}}^{e2} = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{mon}}{S_{твэл}} = \frac{2,243 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 1,483 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_O^{e2}(mon) = \frac{N_O(mon) \cdot S_{mon}}{S_{твэл}} = \frac{4,639 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 3,067 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Zr}^{e2} = \frac{N_{Zr} \cdot S_{об}}{S_{твэл}} = \frac{4,265 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{0,65} = 1,139 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Nb}^{e2} = \frac{N_{Nb} \cdot S_{об}}{S_{твэл}} = \frac{4,216 \cdot 10^{20} \cdot 0,173}{0,65} = 1,126 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{He}^{e2} = \frac{N_{He} \cdot S_{He}}{S_{твэл}} = \frac{2,687 \cdot 10^{19} \cdot 0,048}{0,65} = 1,979 \cdot 10^{18} \text{ ядер/см}^3.$$

2.4 Расчет микроскопических и макроскопических сечений

Для удобства расчетов в теории реакторов принято, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую эффективную температуру (температура нейтронного газа – $T_{н.г.}$), которая превышает температуру замедлителя.

Поперечные сечения поглощения и деления, отнесенные к средней скорости тепловых нейтронов, определялись по формуле:

$$\sigma_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \text{ [барн]}; \quad (2.12)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \text{ [барн]}, \quad (2.13)$$

где $\sigma_{a_0}, \sigma_{f_0}$ – табличные значения сечений [12];

f_a, f_f – поправочные коэффициенты, учитывающие отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/v$.

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 50-100 градусов. Было принято $T_{н.г.} = 393 \text{ К}$.

Макроскопические поперечные сечения вычислялись следующим образом:

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot N_i, [\text{см}^{-1}], \quad (2.14)$$

причем:

$$\sigma_i^s = \sigma_i^{in} + \sigma_i^e, [\text{барн}]; \quad (2.15)$$

$$\sigma_i^{tr} = \sigma_i^a + \sigma_i^{in} + \sigma_i^e \cdot (1 - \mu_{e_i}), [\text{барн}]. \quad (2.16)$$

Замедляющая способность вещества оценивалась по соотношению:

$$\xi \Sigma_s = \sum_{i=1}^m \xi_i \cdot \Sigma_{s_i}, \quad (2.17)$$

где ξ_i – логарифмический декремент,

$$\xi_i = 1 + \frac{(A_i - 1)^2}{2 \cdot A_i} \cdot \ln \left(\frac{A_i - 1}{A_i + 1} \right). \quad (2.18)$$

Для гомогенных смесей и гетерогенных сред, рассматриваемых как гомогенные, все макроскопические сечения вычислялись по общему правилу:

$$\Sigma = \sum_{i=1}^m \sigma_i \cdot N_i, [\text{см}^{-1}]. \quad (2.19)$$

2.4.1 Расчет микроскопических и макроскопических сечений U^{235}

$\sigma_{a_0} = 683$ барн – табличное значение сечения поглощения для U^{235} ;

$\sigma_{f_0} = 582$ барн – табличное значение сечения деления для U^{235} ;

$f_a = f_f = 0,96133$ – поправочные коэффициенты для U^{235} .

Тогда, с учетом поправок, сечения для U^{235} пересчитывались по формулам (2.12) и (2.13):

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96133 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 501,168 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,96133 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 427,056 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{235}} = 15 \text{ барн};$$

$$\sigma_c^{U^{235}} = 101 \text{ барн};$$

$$\mu_e^{U^{235}} = 0;$$

$$\sigma_{tr}^{U^{235}} = 501,168 + 15 \cdot (1 - 0) = 516,168 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 501,168 \cdot 10^{-24} \cdot 7,656 \cdot 10^{20} = 0,38369 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 427,056 \cdot 10^{-24} \cdot 7,656 \cdot 10^{20} = 0,32695 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_c^{U^{235}} = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 7,656 \cdot 10^{20} = 0,07732 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 7,656 \cdot 10^{20} = 0,01148 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 516,168 \cdot 10^{-24} \cdot 7,656 \cdot 10^{20} = 0,39517 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi^{U^{235}} = 1 + \frac{(235-1)^2}{2 \cdot 235} \cdot \ln\left(\frac{235-1}{235+1}\right) = 0,008487;$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 0,008487 \cdot 0,01148 = 9,74582 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}}(z1) = 501,168 \cdot 10^{-24} \cdot 2,334 \cdot 10^{20} = 0,11699 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}}(z1) = 427,056 \cdot 10^{-24} \cdot 2,334 \cdot 10^{20} = 0,09969 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_c^{U^{235}}(z1) = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 2,334 \cdot 10^{20} = 0,02358 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}}(z1) = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 2,334 \cdot 10^{20} = 0,00350 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}}(z1) = 516,168 \cdot 10^{-24} \cdot 2,334 \cdot 10^{20} = 0,12049 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}}(z1) = 0,008487 \cdot 0,00350 = 2,97 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}}(z2) = 501,168 \cdot 10^{-24} \cdot 5,061 \cdot 10^{20} = 0,25363 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}}(z2) = 427,056 \cdot 10^{-24} \cdot 5,061 \cdot 10^{20} = 0,21613 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_c^{U^{235}}(z2) = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 5,061 \cdot 10^{20} = 0,05112 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}}(z2) = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 5,061 \cdot 10^{20} = 0,00759 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}}(z2) = 516,168 \cdot 10^{-24} \cdot 5,061 \cdot 10^{20} = 0,26123 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}}(z2) = 0,008487 \cdot 0,00759 = 6,44 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

Результаты расчета макроскопических сечений для остальных элементов представлены в приложении А таблицах А.1-А.3

2.5 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

Коэффициент размножения для бесконечной среды определялся как произведение четырёх сомножителей:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta, \quad (2.20)$$

где μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;
 φ – вероятность избежать резонансного захвата;
 θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;
 η – коэффициент выхода нейтронов на одно поглощение.

2.5.1 Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение

Топливо применяется в виде сплава и выражение для η имело вид:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_f^{топл}}{\Sigma_a^{топл}}, \quad (2.21)$$

где ν_f – число нейтронов, испускаемое при одном акте деления.

$$\eta = 2,42 \cdot \frac{0,32695}{0,42830} = 1,8474.$$

2.5.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах

Величина μ (коэффициент размножения на быстрых нейтронах) в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топлива.

При расчете величины μ для тесных решеток использовалась формула:

$$\mu_{mec} = \mu + \frac{\mu_{\infty} - \mu}{1 + 2,3 \cdot \frac{N_H}{N_8}}, \quad (2.22)$$

где $\mu_{\infty} = 1,19$;

$\frac{N_H}{N_8}$ – отношение числа атомов водорода к числу атомов U^{238} ;

μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах для одиночного блока, но помещенного в разреженную решетку.

Уран-водное отношение находилось следующим образом:

$$\frac{N_H}{N_8} = 2 \cdot \frac{S_{mn} \cdot \rho_{H_2O} \cdot 270}{S_{mon} \cdot \rho_{UO_2} \cdot 18 \cdot (1 - C_{U^{235}})}; \quad (2.23)$$

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P}, \quad (2.24)$$

где P – вероятность того, что быстрый нейтрон испытывает какое-либо столкновение с ядром U^{238} (определяется из графической зависимости и зависит от геометрических размеров и формы топливного блока).

Для $R_{mon} = 0,3765$ см принималось $P = 0,08$:

$$\frac{N_H}{N_8} = 2 \cdot \frac{0,76 \cdot 1 \cdot 270}{0,43 \cdot 10,4 \cdot 18 \cdot (1 - 0,033)} = 5,270784;$$

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,08}{1 - 0,52 \cdot 0,08} = 1,007679;$$

$$\mu_{mec} = 1,007679 + \frac{1,19 - 1,007679}{1 + 2,3 \cdot 5,270784} = 1,0216.$$

2.5.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов

Для расчета данного коэффициента использовался второй вид гомогенизации, при котором гетерогенная ячейка заменялась двухзонной.

Расчёт в этом случае проводился в два этапа. Сначала определялась величина θ_ϕ , представляющая собой отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов:

$$\theta_\phi = \frac{1}{1 + F \cdot \frac{S_{mn} \cdot \Sigma_a^{H_2O}}{S_\phi \cdot \Sigma_a^\phi} + (E - 1)}. \quad (2.25)$$

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования:

$$F = \frac{R_\phi}{L_\phi} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}{I_1\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}. \quad (2.26)$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{mn}}{L_{mn}}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{R_{mn}}{L_\phi}\right) - 0,75\right). \quad (2.27)$$

Затем рассчитывался коэффициент использования тепловых нейтронов по формуле:

$$\theta = \theta_\phi \cdot \theta_0, \quad (2.28)$$

где θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока.

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^{mon}(z2)}{\Sigma_a^\phi}. \quad (2.29)$$

$$R_{mn} = \sqrt{\frac{S_{яч}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,41}{3,14}} = 0,67 \text{ см.}$$

С помощью усреднённых сечений по фиктивному блоку длина диффузии определялся таким образом:

$$L_\phi = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^\phi \cdot \Sigma_a^\phi}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,607482 \cdot 0,285362}} = 1,386675 \text{ см,}$$

$$L_{mn} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{mn} \cdot \Sigma_a^{mn}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 2,31 \cdot 0,0221}} = 2,555273 \text{ см,}$$

$$F = \frac{0,455}{1,386675} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{I_0\left(\frac{0,455}{1,386675}\right)}{I_1\left(\frac{0,455}{1,386675}\right)} = 1,013398,$$

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{0,67}{2,555273} \right)^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{0,67}{1,386675} \right) - 0,75 \right) = -0,05078,$$

$$\theta_0 = \frac{0,283124}{0,285362} = 0,992158,$$

$$\theta_\phi = \frac{1}{1 + 1,013398 \cdot \frac{0,759654 \cdot 0,0221}{0,65 \cdot 0,285362} - 0,05078} = 0,960718,$$

$$\theta = 0,960718 \cdot 0,992158 = 0,9532.$$

2.5.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата

В энергетических ядерных реакторах, как правило, применяются сборки твэлов, которые состоят из нескольких блоков ядерного горючего. Для ячейки со стрежневыми блоками коэффициент φ рассчитывался по формуле:

$$\varphi = \exp \left(- \frac{k_T \cdot R_U \cdot \sqrt{R_U \cdot \mu_1} + 0,73 \cdot R_U^2 \cdot \mu_1}{\xi \Sigma_s^{H_2O} \cdot S_{mn} + \xi \Sigma_s^\phi \cdot S_\phi} \right) \cdot \frac{\Sigma_a^U}{\Sigma_a^\phi}, \quad (2.30)$$

где k_T – температурный коэффициент;

R_U – радиус уранового блока, см;

μ_1 – пористость блока по U^{238} ;

Коэффициент k_T вычислялся по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{mon}}). \quad (2.31)$$

При температуре 293 К температурный коэффициент был равен:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{293}) = 1,007.$$

Пористость определялась как:

$$\mu_1 = \frac{N^{U^{238}}}{N^{U^{238}_{природ}}} = \frac{2,243 \cdot 10^{22}}{\frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 19,05 \cdot (1 - 0,00714)}{238}} = 0,47.$$

$$\varphi = \exp \left(- \frac{1,007 \cdot 0,377 \cdot \sqrt{0,377 \cdot 0,47} + 0,73 \cdot 0,377^2 \cdot 0,47}{1,35 \cdot 0,76 + 0,016248 \cdot 0,65} \right) \cdot \frac{0,283124}{0,285362} = 0,79.$$

При подстановке найденных значений коэффициентов в формулу (2.20) находился коэффициент размножения для бесконечной среды:

$$k_{\infty} = 1,8474 \cdot 1,0216 \cdot 0,9532 \cdot 0,7995 = 1,4383.$$

2.6 Оптимизация параметров ячейки

После расчета было необходимо подобрать такие параметры ячейки, при которых данный коэффициент достигает максимального значения. В некоторых диапазонах варьировались шаг расстановки твэлов и радиус топливного блока. Полученные зависимости изображены на рисунках 2.4 и 2.5.

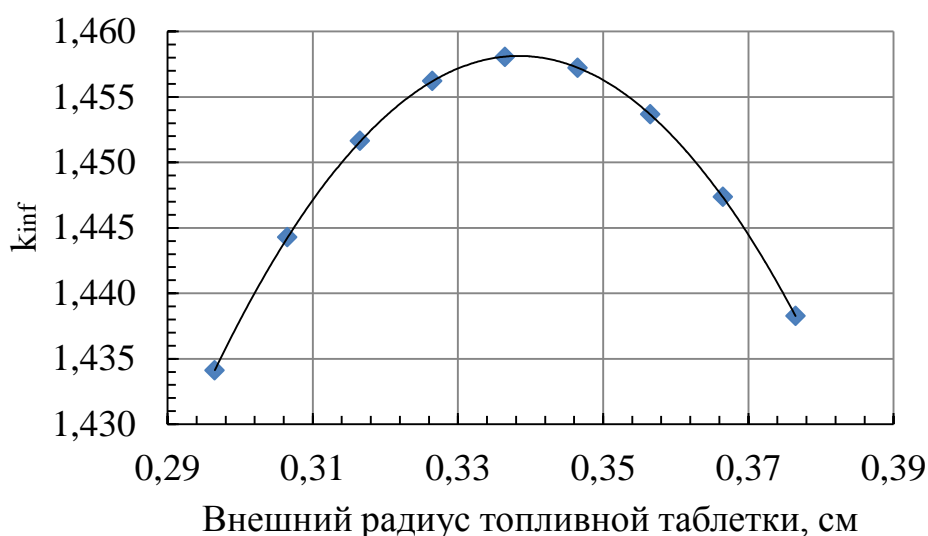


Рисунок 2.4 – Зависимость k_{∞} от внешнего радиуса топливной таблетки

Как можно увидеть из графика, уменьшение размеров твэла при сохранении шага между ними способствовало улучшению свойств размножающей среды. Значение внешнего радиуса топливной таблетки, соответствующее максимальному k_{∞} , равно $R_{mon} = 0,3365$ см. Дальнейшая оптимизация проводилась при сохранении полученного размера и изменении шага твэла.

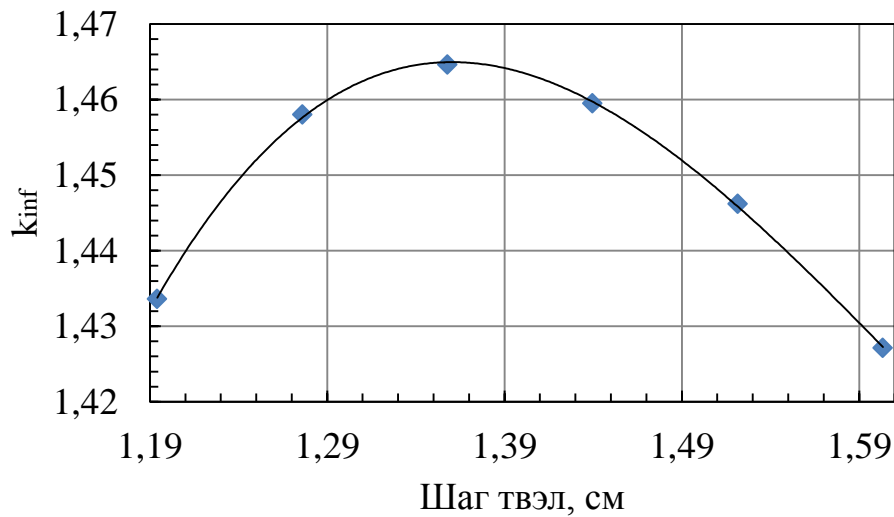


Рисунок 2.5 – Зависимость k_{∞} от шага твэл

Наибольшее значение $k_{\infty} = 1,4646$ было достигнуто при шаге твэл равном $h = 1,358$ см. При этом скорость прокачки теплоносителя была равна $v = 2,52$ м/с, что не превышало установленных требований. Однако уменьшение размеров твэла приводит к уменьшению массы загружаемого топлива и соответственно к уменьшению длины кампании, что является экономически нецелесообразным. В связи с этим дальнейшие расчеты проводились с сохранением размеров элементарной ячейки ВВЭР-1000.

2.7 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения вычислялся как:

$$k_{\text{эф}} = \frac{k_{\infty} \cdot e^{(-\tau \cdot B^2)}}{1 + B^2 \cdot L^2}, \quad (2.32)$$

где τ – возраст нейтронов в решетке, см^2 ;

B^2 – геометрический параметр, см^{-2} ;

L – длина диффузии в решетке, см;

Квадрат длины диффузии в решетке реактора рассчитывался по формуле:

$$L^2 = L_{mn}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{\phi}^2 \cdot \theta, \quad (2.33)$$

$$L^2 = 2,555^2 \cdot (1 - 0,953184) + 1,444066^2 \cdot 0,953184 = 2,138527 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов в решетке оценивался по приближенной формуле:

$$\tau = \tau_{зам} \cdot \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^{0.5}, \quad (2.34)$$

где $\tau_{зам} = 27,3 \text{ см}^2$ – возраст нейтронов в замедлителе.

$$\tau = 27,3 \cdot \left(\frac{1,410042}{0,759654} \right)^{0.5} = 37,19383 \text{ см}^2.$$

Для реактора с отражателем было необходимо учитывать эффективную добавку за счет отражателя. Так, для цилиндрического реактора [13]:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H_э} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R_э} \right)^2, \quad (2.35)$$

где $H_э, R_э$ – эквивалентные размеры реактора, см;

$$H_э = H_{Акз} + 2 \cdot \delta, [\text{см}]; \quad (2.36)$$

$$R_э = R_{Акз} + \delta, [\text{см}], \quad (2.37)$$

где δ – эффективная надбавка за счет отражателя, см;

Для водо-водяных реакторов с водным отражателем:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40) = 7,2 + 0,1 \cdot (39,332 - 40) = 7,133235 \text{ см}.$$

$$H_э = 360 + 2 \cdot 7,133235 = 374,26647 \text{ см},$$

$$R_э = 180 + 7,133235 = 187,133235 \text{ см},$$

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{374,26647} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{187,133235} \right)^2 = 1,88 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}.$$

Подставляя полученные значения, был определен эффективный коэффициент размножения реактора:

$$k_{эф} = \frac{1,4383 \cdot e^{(-37,19383 \cdot 1,88 \cdot 10^{-4})}}{1 + 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot 2,138527} = 1,4270.$$

2.8 Расчет параметров стационарного горячего реактора

При увеличении мощности реактора до номинального уровня происходит изменение температуры материалов, входящих в состав активной

зоны. В результате этого происходит изменение плотности материалов и микроскопических сечений взаимодействий, что оказывает непосредственное влияние на размножающие свойства среды.

С ростом температуры материалов происходит уменьшение их плотности вследствие теплового расширения, что приводит к уменьшению макроскопических сечений взаимодействий.

Также при увеличении температуры происходит изменение микроскопических сечений вследствие увеличения скорости теплового движения молекул и, соответственно, ядер. Одновременно с этим происходит увеличение ширины резонансных уровней и уменьшение амплитуды соответствующих сечений в результате проявления эффекта Доплера.

2.8.1 Изменение микроскопических сечений взаимодействий

Для расчета реактора при рабочей температуре было необходимо найти эффективную температуру нейтронного газа и соответствующие ей значения сечений и других параметров реактора.

При расчете принималось, что температура замедлителя было равна средней температуре теплоносителя, равной:

$$T_{зам} = \frac{T_{вх} + T_{вых}}{2} = 442,5 \text{ К.}$$

Эффективная температура нейтронного газа определялась по формуле (2.38):

$$T_{эф}^{н.г.} = T_{зам} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{\bar{\Sigma}_{аяч.}}{\xi \cdot \bar{\Sigma}_{сяч.}} \right), \text{ [К]}. \quad (2.38)$$

Сечения при температуре нейтронного газа определялись по следующей формуле:

$$\bar{\sigma}_a(T_{н.г.}) = 0,886 \cdot \sigma_{a0} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}} \cdot f_a(T_{н.г.}) \cdot F(\chi), \quad (2.39)$$

где σ_{a0} – макроскопическое сечение поглощения для стандартных нейтронов;

$f_a(T_{н.г.})$ – поправочный коэффициент, характеризующий отклонение сечения от закона $1/v$;

Данная зависимость также применима к микроскопическому сечению деления.

Было необходимо узнать верхнюю границу тепловой группы. Для тепловых и не очень жестких промежуточных нейтронов границей тепловой группы условно считается точка пересечения спектров Ферми и Максвелла. Эта точка определялась через трансцендентное уравнение:

$$f(\chi_{гр.}) = \frac{\chi_{гр.}^2 \cdot e^{-\chi_{гр.}}}{1 - (1 + \chi_{гр.}) \cdot e^{-\chi_{гр.}}} = \frac{\Sigma_a(E_{гр.}, E_T)}{\xi \cdot \Sigma_s}, \quad (2.40)$$

где $\chi_{гр.} = \frac{E_{гр.}}{E_T}$.

Решения данного уравнения представлены на рисунке 2.6.

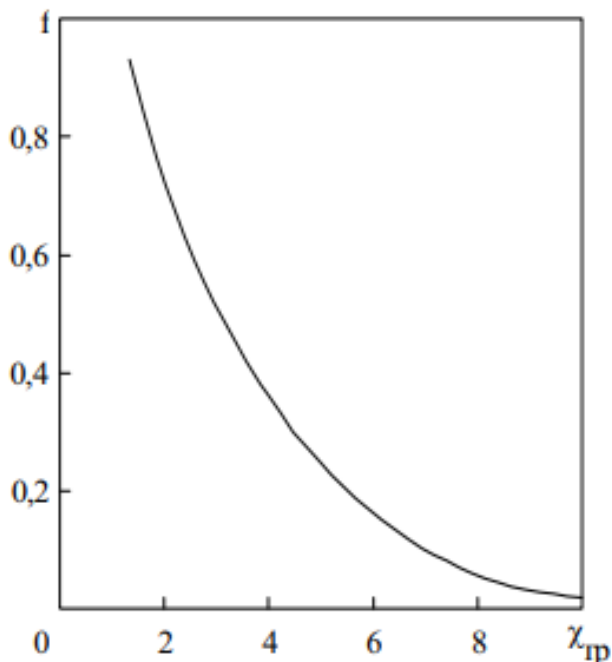


Рисунок 2.6 – Множество решений трансцендентного уравнения

Для начала расчета сечений и температуры нейтронного газа температура нейтронов принималась равной температуре замедлителя и было взято пробное значение $F(\chi) = 1,05$. Тогда с учетом заданных величин и

изменения плотности материалов усредненные значения макроскопических констант ячейки были равны:

$$\bar{\Sigma}_{аяч.} = \frac{\Sigma_{амон} \cdot S_{мон} + \Sigma_{азам} \cdot S_{зам} + \Sigma_{аоб} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = 0,018233755 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \cdot \bar{\Sigma}_{сяч.} = \frac{\xi_{мон} \cdot \Sigma_{смон} \cdot S_{мон} + \xi_{зам} \cdot \Sigma_{сзам} \cdot S_{зам} + \xi_{об} \cdot \Sigma_{соб} \cdot S_{об}}{S_{яч}} = 0,095320418 \text{ см}^{-1}.$$

Вычислялось соответствующее значение функции $f(\chi_{гр.})$ и определялось из рисунка 2.6 значение $\chi_{гр.}$.

$$f(\chi_{гр.}) = \frac{\bar{\Sigma}_{аяч.}}{\xi \cdot \bar{\Sigma}_{сяч.}} = 0,191289.$$

Из рисунка 2.7 было определено значение $\chi_{гр.}$ для пробного значения $F(\chi)$. Полученные значения были равны соответственно 4,7 и 5,8.

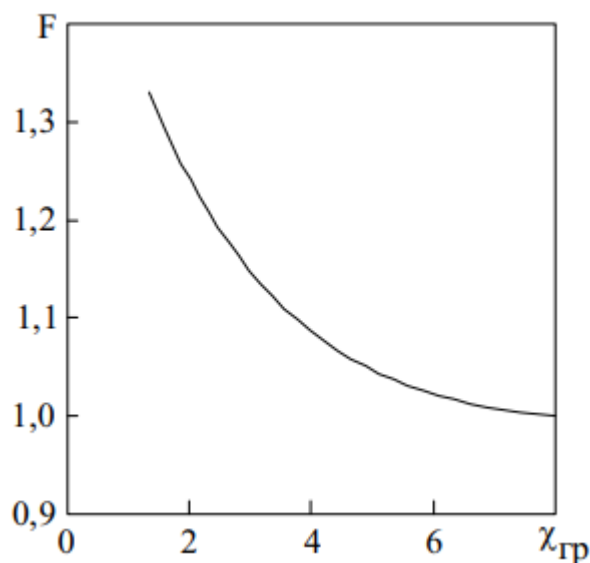


Рисунок 2.7 – Усреднение сечений поглощения по спектру Максвелла

Наблюдалось сильное отклонение фактического значения от пробного, что говорило о необходимости уточнения значений путем пересчета с использованием последних полученных значений и сравнения результата с предыдущим значением. Уточнение производилось до достижения достаточной точности расчета. Температура нейтронного газа, используемая во втором шаге, была равна:

$$T_{эф}^{н.э.} = 442,5 \cdot (1 + 1,4 \cdot 0,191289) = 561 \text{ К.}$$

После серии уточнений были получены следующие значения:

- $f(\chi_{эп.}) = 0,162263$;
- $F(\chi) = 1$;
- $T_{эф}^{н.э.} = 543 \text{ К.}$

Результаты расчета микроскопических констант представлены в таблице

2.3. Наблюдалось существенное уменьшение соответствующих значений.

Таблица 2.3 – Микроскопические константы материалов горячего реактора

Величина	U ²³⁵	U ²³⁸	O (т)	H ₂ O	Zr	Nb
σ_a , барн	417,446	1,656	0,000	0,000	0,136	0,852
σ_f , барн	355,906	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Для расчета макроскопических констант использовались плотности топлива, оболочки и замедлителя соответствующие температурам 1050 К, 625 К и 442,5 К.

2.8.2 Коэффициент размножения «горячего» реактора

Вследствие изменения плотности материалов, микроскопических сечений взаимодействий и увеличение ширины резонансов происходило изменение коэффициентов формулы четырех сомножителей и, как следствие, коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде. Сравнение результатов расчета соответствующих величин для «холодного» и «горячего» состояния реактора представлено в таблице 2.4.

Выход нейтронов на один поглощенный топливом сохранил свое значение при изменении температуры материалов, так изменение сечений деления и поглощения для материалов топлива подчиняется одной температурной зависимости и, как следствие, поправочные коэффициенты имели одинаковое значение и не оказывали влияние на итоговое отношение.

Таблица 2.4 – Значения коэффициентов формулы четырех сомножителей для «холодного» и «горячего» состояний реактора

Коэффициент	Значение в «холодном» состоянии	Значение в «горячем» состоянии	Изменение
η	1,8474	1,8474	0,0000
μ	1,0216	1,0224	0,0008
θ	0,9532	0,9567	0,0035
φ	0,7995	0,7763	-0,0232
k_{∞}	1,4383	1,4028	-0,0355

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах увеличился вследствие неравномерного изменения плотности материалов и, как следствие, изменения водно-топливного отношения реактора.

Коэффициент использования тепловых нейтронов увеличился вследствие уменьшения относительного поглощения нейтронов в замедлителе и конструкционных материалах и увеличения длины диффузии приводящего к снижению коэффициента проигрыша.

Вероятность избежать резонансного захвата уменьшилась вследствие доплеровского уширения резонансных уровней.

Эффективный коэффициент размножения нейтронов «горячего» реактора определялся по формуле:

$$k_{эфф}^{гор} = \frac{k_{\infty} \cdot e^{(-B^2 \cdot \tau_{гор})}}{1 + B^2 \cdot L_{гор}^2}. \quad (2.41)$$

Возраст нейтронов в горячем реакторе рассчитывался по формуле:

$$\tau_{гор} = \tau_{хол} - \frac{1}{3 \cdot \xi \cdot \Sigma_{яч} \cdot \Sigma_{tr}} \cdot \ln \left(\frac{T_{н.с.}}{293} \right). \quad (2.42)$$

Квадрат длины диффузии для решетки «горячего» гетерогенного реактора рассчитывался также как и для «холодного» реактора. Изменение длины диффузии замедлителя определялось по формуле:

$$L_{зам}(T) = L_{зам}(293) \cdot \left(\frac{T}{293} \right)^{0.48} = 2,555273 \cdot \left(\frac{442,5}{293} \right)^{0.48} = 3,134767.$$

Тогда длина диффузии гетерогенного реактора:

$$L_{гор}^2 = 3,134767^2 \cdot (1 - 0,956741) + 1,63001^2 \cdot 0,956741 = 2,967093.$$

Возраст нейтронов:

$$\tau_{гор} = 37,19383 - \frac{1}{3 \cdot 0,734721 \cdot 1,496} \cdot \ln \left(\frac{543}{293} \right) = 37,00669 \text{ см}^2.$$

Эффективная добавка:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40) = 7,2 + 0,1 \cdot (39,974 - 40) = 7,197378 \text{ см}.$$

$$H_g = 360 + 2 \cdot 7,197378 = 374,394756 \text{ см},$$

$$R_g = 180 + 7,197378 = 187,197378 \text{ см},$$

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{374,394756} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{187,197378} \right)^2 = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}.$$

При подстановке полученных значений, эффективный коэффициент размножения нейтронов «горячего» определился равным:

$$k_{эф} = \frac{1,4028 \cdot e^{(-37,00669 - 1,87 \cdot 10^{-4})}}{1 + 1,87 \cdot 10^{-4} \cdot 2,967093} = 1,3908.$$

Важными характеристиками устойчивости ядерного реактора к колебаниям температуры являются температурный эффект реактивности (ТЭР) и температурный коэффициент реактивности.

Температурным эффектом реактивности реактора (ТЭР) при рассматриваемой средней температуре теплоносителя в активной зоне называется величина изменения реактивности реактора при его разогреве от 20 °С до этой температуры.

Температурный коэффициент реактивности реактора при данной средней температуре теплоносителя – это изменение реактивности реактора при его разогреве на 1 °С сверх этой температуры [14].

ТЭР реактора при номинальных параметрах:

$$\rho_T = \frac{k_{эфф}^{зор} - 1}{k_{эфф}^{зор}} - \frac{k_{эфф}^{хол} - 1}{k_{эфф}^{хол}} = -0,0183.$$

ТКР реактора:

$$\alpha = \frac{\rho_T}{\Delta T} = -1,22 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

Отрицательные значения данных величин свидетельствовали о возможности устойчивой работы реактора.

2.9 Расчет в программе WIMS-D5B

Программа WIMS – программа, написанная на языке ФОРТРАН, предназначенная для детального, нейтронно-физического расчета ячеек реакторов различных типов, в том числе и с учетом выгорания. Программа применяется для расчетов тепловых и быстрых реакторов.

В программе используется универсальная 69-групповая библиотека констант, подготовленных на основе файлов оцененных нейтронных данных (ENDF, JEF, JENDL) в ГНЦ РФ ФЭИ [15]. Библиотека констант содержит 90 нуклидов. Спектр деления соответствует 27 группам, причем максимум приходится на 4 группу (2,231 – 1,353 МэВ). Интервал резонансных энергий (9,118 КэВ – 4 эВ) включает 13 групп. Тепловая область энергий (1 эВ – 0) содержит 30 групп.

Программа может решать задачи в плоской, цилиндрической и сферической одномерных геометриях и в двумерной rz-геометрии. Также имеется возможность учета утечки нейтронов.

2.9.1 Расчет «холодного» реактора

Расчетная модель представляла собой бесконечную по высоте элементарную ячейку водо-водяного реактора, состоящую из ТВЭЛ и окружающего его водяного теплоносителя. Изображение модели представлено на рисунке 2.8. Описание расчетной модели представлено в приложении Б. Реальная шестигранная ячейка при расчете была заменена на цилиндрическую, площадь поперечного сечения которой была равна площади реальной ячейки. Сердечник ТВЭЛ (зона 2) внешним радиусом имел внутреннее отверстие (зона 1). Зона 2 описывала зазор между топливной таблеткой и оболочкой, содержащий гелий, и оболочку ТВЭЛ, зона 3 представляла водяной теплоноситель (и замедлитель). Температура всех материалов была равна 293 К.

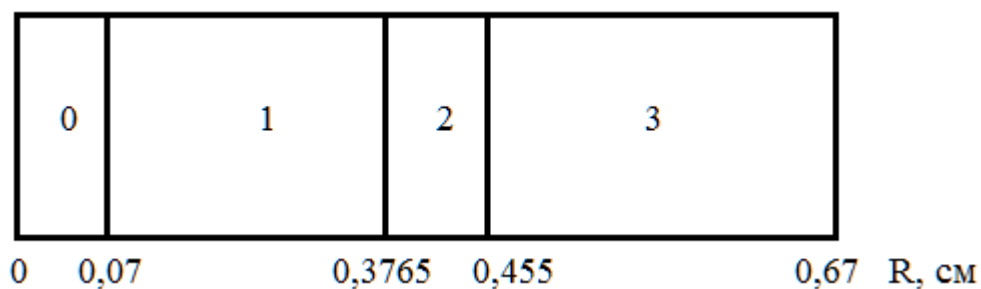


Рисунок 2.8 – Расчетная модель элементарной ячейки

Были получены значения $k_{\infty} = 1,4165$ и $k_{эфф} = 1,4054$.

2.9.2 Расчет «горячего» реактора

При выполнении расчета реактора в «горячем» состоянии использовалась аналогичная предыдущей геометрия модели. Температура топлива, оболочки и замедлителя (теплоносителя) увеличена до 1050 К, 625 К и 442,5 К с соответствующим изменением плотности материалов.

Была получена зависимость изменения коэффициента размножения в бесконечной среде и реактивности реактора в «горячем» состоянии от глубины выгорания топлива, представленная в таблице 2.5 и на рисунке 2.9.

Таблица 2.5 – Изменение реактивности в ходе выгорания топлива

Глубина выгорания, МВт·сут/тU	k_{∞}	$k_{эфф}$	ρ
0	1,3784	1,3666	0,2683
42	1,3386	1,3271	0,2465
420	1,3281	1,3167	0,2405
2100	1,3081	1,2969	0,2289
4200	1,2840	1,2730	0,2145
6300	1,2591	1,2483	0,1989
8400	1,2345	1,2239	0,1830
10500	1,2106	1,2003	0,1668
12600	1,1874	1,1773	0,1506
14700	1,1649	1,1549	0,1342
16800	1,1429	1,1331	0,1175
18900	1,1214	1,1118	0,1006
21000	1,1002	1,0908	0,0833
23100	1,0794	1,0702	0,0656
25200	1,0589	1,0498	0,0475
27300	1,0386	1,0298	0,0289
29400	1,0188	1,0101	0,0100
31500	0,9993	0,9907	-0,0094

Как можно было увидеть, в начале кампании происходило резкое уменьшение реактивности в результате переходного процесса выхода на стационарный уровень отравления ксеноном, продолжающегося в течение 2 суток. Необходимо было учесть, что за данное время происходит сравнительно малое изменение ТЭР и потерь реактивности за счет выгорания и шлакования топлива. Тогда потери реактивности на стационарное отравление ксеноном

можно было оценить как разницу между значениями реактивности, соответствовавшими началу кампании и 2 суткам работы на постоянной мощности. Потери реактивности за счет стационарного отравления ксеноном при работе на номинальной мощности составили $\Delta\rho_{Xe} = 0,0218$.

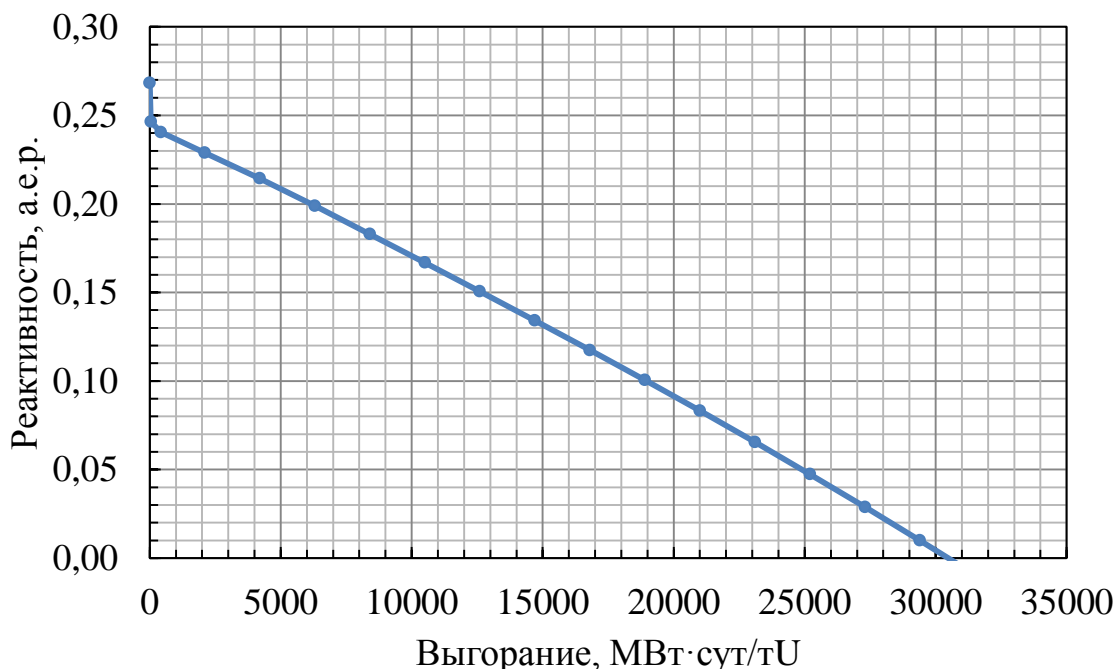


Рисунок 2.9 – Зависимость изменения реактивности от глубины выгорания топлива

После этого происходило немного более медленное снижение реактивности в ходе процесса выхода на стационарный уровень отравления самарием, после чего реактивность снижалась практически линейно до достижения нулевого значения. Максимально достигаемая глубина выгорания в данном реакторе определена равной 30480 МВт·сут/тУ.

Получено распределение плотности потока быстрых и тепловых нейтронов по радиусу ячейки, представленное на рисунке 2.10.

Граница раздела твэла и замедлителя соответствовала радиусу 0,455 см. Плотность потока быстрых нейтронов имела наибольшие значения в зоне, соответствовавшей расположению топливной таблетки в ячейке. Это объясняется тем, что быстрые нейтроны рождаются при делении ядер горючего, которое в свою очередь является слабым замедлителем. В то же время быстрые

нейтроны, попадая в замедлитель, быстро теряют энергию и переходят в тепловую область энергий, в связи с чем плотность потока тепловых нейтронов в замедлителе возрастает с радиусом ячейки. Уменьшение плотности потока тепловых нейтронов в зоне топлива связано с наличием в данной зоне большого количества сильного поглотителя.

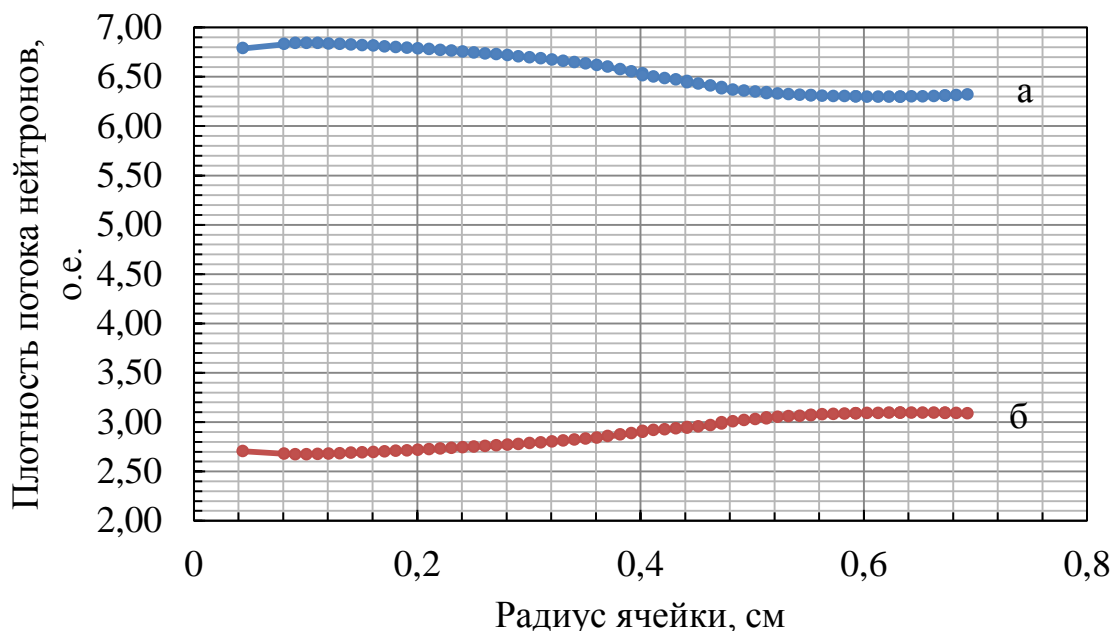


Рисунок 2.10 – Зависимость плотности потока от радиуса ячейки:

а – быстрых нейтронов; б – тепловых нейтронов

Получена зависимость распределения энерговыделения от радиуса ячейки для начала и конца кампании, представленная на рисунке 2.11. Максимальное значение радиального коэффициента неравномерности энерговыделения в начале кампании составило 1,042.

Энерговыделение формируется за счет деления ядер горючего нейтронами, в результате чего в замедлителе и конструкционных материалах оно отсутствует. При этом основная доля энерговыделения приходилась на периферийную часть топливной таблетки, что являлось результатом внутреннего блок-эффекта. К концу кампании наблюдалось уменьшение доли энерговыделения в периферийной зоне и увеличение в центральной зоне, что говорило об увеличении прозрачности внешних слоев в результате выгорания.

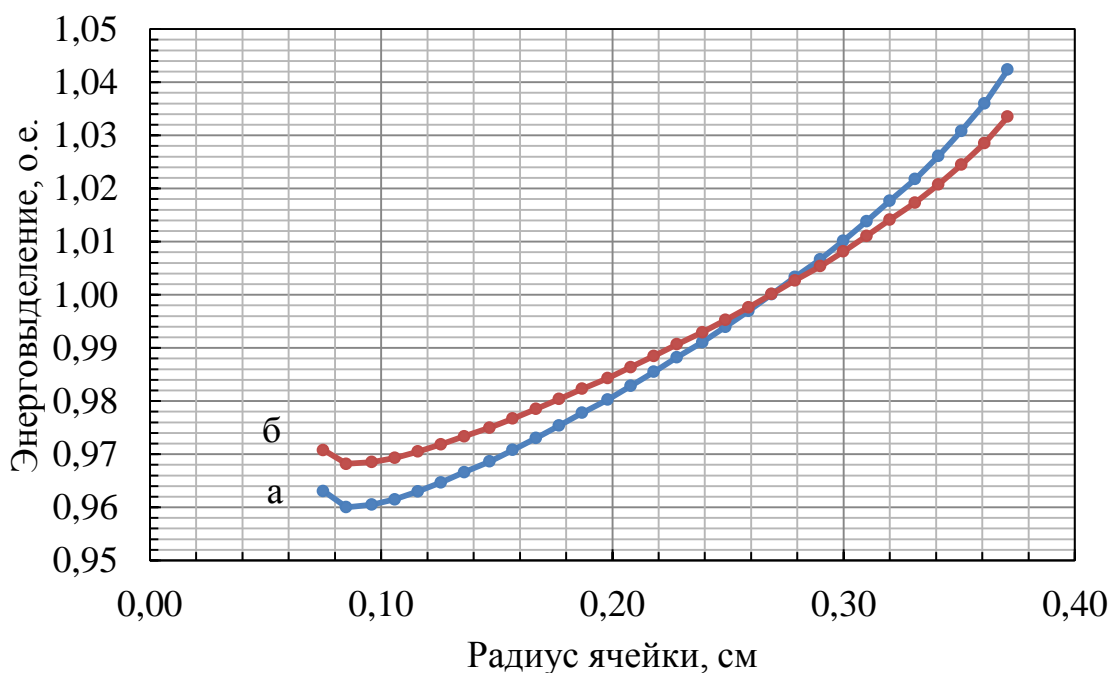


Рисунок 2.11 – Распределение энерговыделения по радиусу ячейки:

а – начало кампании; б – конец кампании

Получено изменение ядерных концентраций изотопов U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} и Pu^{241} в зависимости от глубины выгорания топлива, представленное на рисунках 2.12 – 2.14.

Из полученных значений видно, что в ходе кампании происходило постепенное равномерное выгорание U^{235} и U^{238} , и образование изотопов плутония. U^{235} выгорал в результате деления и радиационного захвата. При этом, несмотря на постоянное значение удельного энерговыделения, а, следовательно, и скорости деления, было видно, что это выгорание подчиняется нелинейному закону. Это объясняется тем, что со временем нарабатываемый плутоний также начинал делиться, и доля делений урана постепенно уменьшалась, в результате чего замедлялось и выгорание. Со временем концентрация Pu^{239} в ходе кампании достигла стационарного значения, когда скорость распада данного изотопа стала равна скорости его образования.

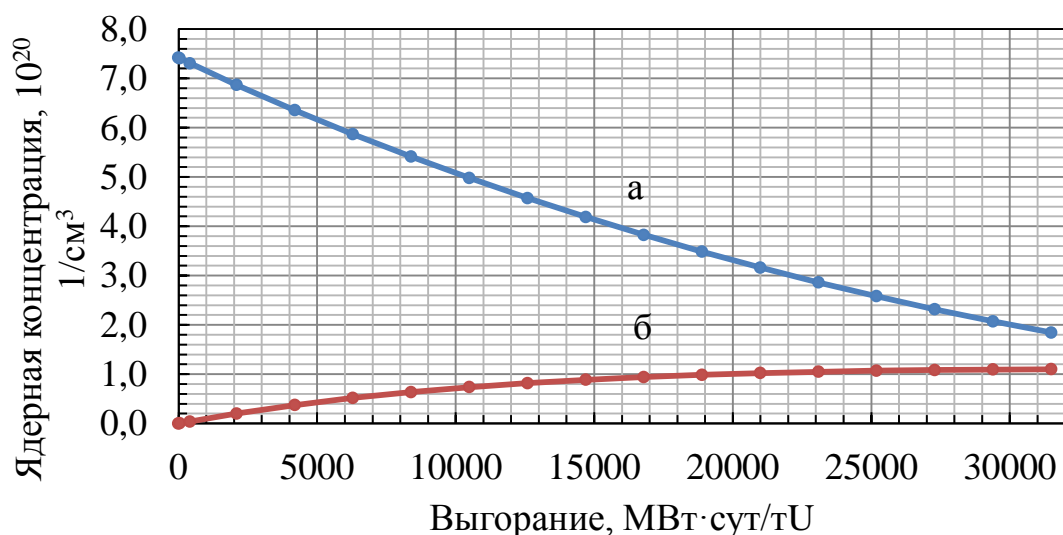


Рисунок 2.12 – Зависимость изменения ядерной концентрации от глубины выгорания изотопов: а – U^{235} ; б – Pu^{239}

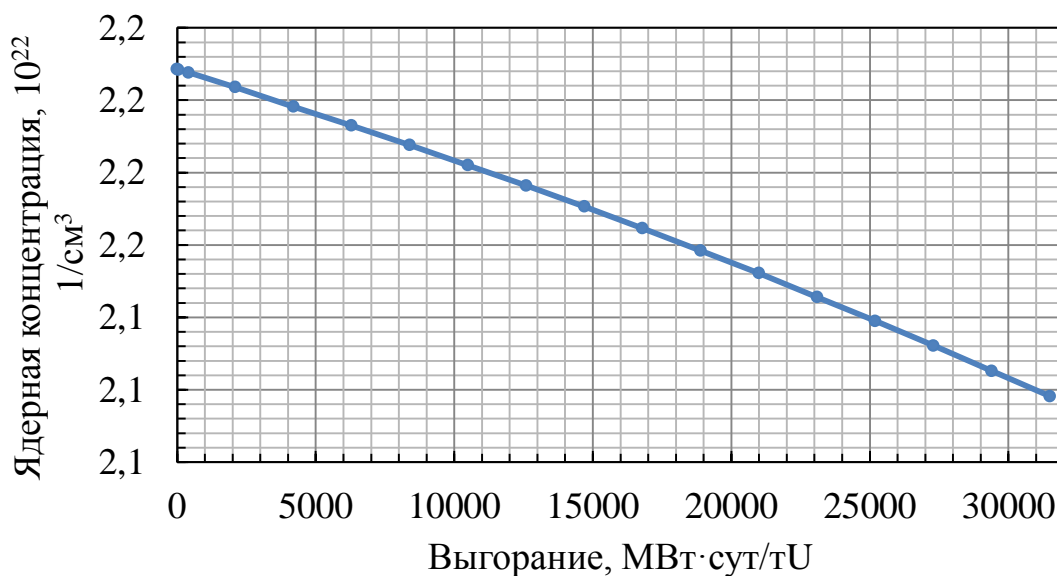


Рисунок 2.13 – Зависимость изменения ядерной концентрации от глубины выгорания изотопа U^{238}

Изотоп U^{238} выгорал в результате деления быстрыми нейтронами и радиационного захвата. При постоянном энерговыделении скорость радиационного захвата также оставалась неизменной, в результате чего изменение концентрации данного изотопа имело характер, близкий к линейному.

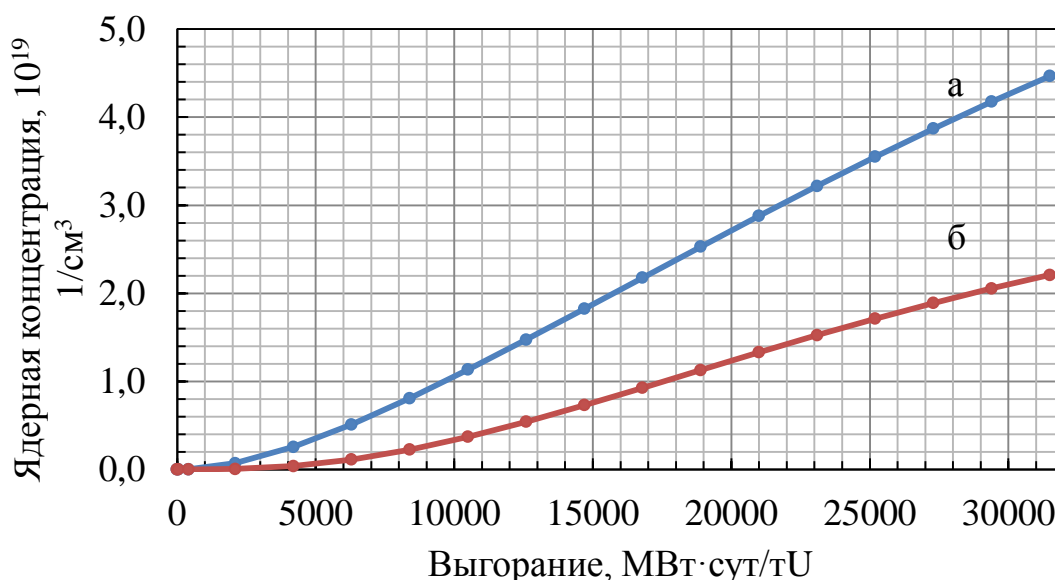


Рисунок 2.14 – Зависимость изменения ядерной концентрации от глубины выгорания изотопов: а – Pu^{240} ; б – Pu^{241}

Изотопы Pu^{240} и Pu^{241} практически не подвергались распаду, в результате чего при постоянном энерговыделении они образовывались с неизменной скоростью, и закон изменения концентрации имел линейный характер. Однако, данные изотопы образовывались в случае 2-х и более последовательных захватов нейтронов, что обуславливало задержку в их образовании, выразившуюся в отклонении закона изменения концентрации от линейного в начале кампании.

2.9.3 Сравнение полученных результатов

Сравнение результатов расчета коэффициентов размножения нейтронов в бесконечной среде для «холодного» и «горячего» состояний реактора представлено в таблице 2.6.

Применение одногруппового метода привело к завышению значений коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде для «холодного» и «горячего» состояний реактора на 1,5390 % и 1,7394 % относительно программного расчета соответственно. Это объяснялось завышением значений сечений взаимодействий для быстрой и промежуточной областей энергий в случае применения одногруппового метода.

Таблица 2.6 – Результаты расчета коэффициента размножения в бесконечной среде

Метод	«холодное» состояние	«горячее» состояние
Одногрупповой	1,4383	1,4028
Wims–D5B	1,4165	1,3784
Отклонение, % (относительно WIMS-D5B)	1,5390	1,7394

При применении данных методик наблюдалось отрицательное значение ТЭР, что говорит о возможности устойчивой работы реактора в условиях колебания температуры материалов. Значение ТЭР, полученное в результате программного расчета, равнялось -0,02 а.е.р.

2.10 Теплофизический расчет реактора

2.10.1 Максимальные значения величин

Максимальное значение энерговыделения соответствовало центру активной зоны с координатами $z=0$ и $r=0$. В этом случае максимальное значение объемной плотности тепловыделения в топливе определялось соотношением:

$$q_v^{\max} = q_v(z=0, r=0) = \frac{N \cdot k_v}{n_{\text{касет}} \cdot n_{\text{твэл}} \cdot \pi \cdot R_{\text{ТТ}}^2 \cdot H_{\text{а.з.}}}, \quad (2.43)$$

где N – мощность реактора, МВт;

k_v – коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны;

$n_{\text{касет}}$ – число топливных кассет;

$n_{\text{твэл}}$ – число тепловыделяющих элементов в кассете;

$R_{\text{ТТ}}$ – радиус топливной таблетки, см;

$H_{\text{а.з.}}$ – высота активной зоны, см.

Определены площади активной зоны и ТВС по формулам (2.44) и (2.45), с учетом того, что активная зона формировалась с сечением в виде правильного шестиугольника:

$$S_{a.з.} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot D_{a.з.}^2}{8}, \quad (2.44)$$

$$S_{TBC} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{h_{TBC}}{2} \right)^2, \quad (2.45)$$

где $D_{a.з.}$ – диаметр активной зоны, см;

h_{TBC} – размер под ключ ТВС, см.

Тогда:

$$S_{a.з.} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot 360^2}{8} = 84177,67 \text{ см}^2,$$

$$S_{TBC} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{23,51}{2} \right)^2 = 478,6696 \text{ см}^2.$$

Определено число ТВС, необходимое для заполнения активной зоны:

$$n = \frac{S_{a.з.}}{S_{TBC}} = \frac{84177,67}{478,6696} \approx 175.$$

Коэффициент неравномерности энергоснабжения по объему активной зоны зависит от множества факторов, таких как обогащение и выгорание топлива, наличие поглощающих элементов, геометрических размеров активной зоны и других. В ходе предварительного расчета было определено значение равное 2,3. Тогда максимальное значение объемной плотности тепловыделения:

$$q_v^{\max} = \frac{3000 \cdot 2,3}{175 \cdot 312 \cdot \pi \cdot 0,3765^2 \cdot 360} = 7,88 \cdot 10^{-4} \text{ [МВт/см}^3\text{]}.$$

Найдено максимальное значение линейной плотности тепловыделения и поверхностного теплового потока:

$$q_l^{\max} = q_v^{\max} \cdot \pi \cdot R_{TT}^2 = 7,88 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14 \cdot 0,3765^2 = 3,51 \cdot 10^{-4} \text{ [МВт/см]},$$

$$q_s^{\max} = \frac{q_v^{\max} \cdot R_{TT}}{2} = \frac{7,88 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3765}{2} = 1,48 \cdot 10^{-4} \text{ [МВт/см}^2\text{]}.$$

2.10.2 Расчет значений q_v , q_l и q_s по высоте наиболее энергонапряженной (центральной) кассеты

Для проведения расчетов было необходимо разделить топливную кассету на 36 равных частей с длиной, равной 10 см. Нумерация участков начиналась от входа воды в активную зону, расположенного снизу. Координаты, соответствующие середине i -го участка, определялись по формуле (2.46):

$$z_i = -\frac{H_{a.з.}}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot i - 1}{36}\right). \quad (2.46)$$

Значение потоков q_v , q_l и q_s определялись по формулам (2.47) – (2.49):

$$q_{vi} = q_v^{\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z_i}{H_{a.з.}}\right), \quad (2.47)$$

$$q_{li} = q_l^{\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z_i}{H_{a.з.}}\right), \quad (2.48)$$

$$q_{si} = q_s^{\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z_i}{H_{a.з.}}\right). \quad (2.49)$$

Результаты расчетов представлены в приложении В таблице В.1 и в графическом виде на рисунках В.1 – В.3.

Наибольшее значение плотностей энерговыделения наблюдалась в зонах, границей которых являлось начало координат. Распределение энерговыделения имело симметричную относительно начала координат форму.

2.10.3 Расчет температурного состояния теплоносителя по длине топливного канала

Количество тепла, выделяемое на i -ом участке, определялось соотношением (2.50):

$$Q_i = q_{li} \cdot \Delta z \cdot n_{\text{мвэл}}, \quad (2.50)$$

где $\Delta z = 10 \text{ см}$.

Результаты расчета представлены в таблице 2.7.

Для определения погрешности определенных величин было необходимо найти суммарное тепловыделение в топливном канале в дискретном и интегральном представлении:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{36} Q_i = 25,109 \text{ МВт},$$

$$Q_{\Sigma}^* = \frac{2 \cdot q_l^{\max} \cdot H_{a.з.} \cdot n_{мвэл}}{\pi} = 25,101 \text{ МВт}.$$

Погрешность расчета была равна:

$$\delta = \frac{Q_{\Sigma} - Q_{\Sigma}^*}{Q_{\Sigma}^*} \cdot 100 = \frac{25,109 - 25,101}{25,101} \cdot 100 = 0,031738 \%.$$

Подогрев теплоносителя определялся соотношением (2.51):

$$\Delta t = \frac{Q_{\Sigma}}{C_p \cdot G}, \quad (2.51)$$

где $C_p = 4312,7 \text{ КДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Подогрев теплоносителя в активной зоне:

$$\Delta t = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}} = 208 - 131 = 77 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Тогда расход теплоносителя:

$$G = \frac{Q_{\Sigma}}{C_p \cdot \Delta t} = \frac{25,109 \cdot 10^3}{4312,7 \cdot 77} = 75,6117 \text{ кг/с}.$$

Подогрев теплоносителя на каждом участке кассеты определялся по соотношению:

$$\Delta t_i = \frac{Q_i}{G \cdot C_{pi}}, \quad (2.52)$$

где C_{pi} – удельная теплоемкость теплоносителя при температуре на i -м участке.

Так как теплоемкость на каждом участке была неизвестна, использовался метод подбора.

Температура теплоносителя на i -м участке:

$$\bar{t}_i = t_{i-1} + \frac{Q_i}{G \cdot C_{pi}}, \quad (2.53)$$

где C_{pi} в первом приближении задавалась равной C_{pi-1} .

Затем значение C_{pi} уточнялось по соотношениям:

$$\bar{t}_i = \frac{t_i + t_{i-1}}{2}, \quad (2.54)$$

$$C_{pi} = f(\bar{t}_i), \quad (2.55)$$

где функция $C_p = f(t)$ табулирована [16].

После этого вычисление \bar{t}_i повторялось и определялось значение t_i с использованием уточненного значения C_{pi} .

Результаты расчета представлены в таблице 2.7 и в виде гистограммы в приложении Г рисунок Г.1.

Таблица 2.7 – Изменение тепловыделения, температуры и скорости прокачки теплоносителя

i	Q_i , МВт	t_i , °C	v_i , м/с
1	0,048	131,150	2,912
2	0,143	131,597	2,913
3	0,237	132,338	2,915
4	0,329	133,368	2,918
5	0,419	134,678	2,921
6	0,506	136,257	2,925
7	0,589	138,094	2,930
8	0,667	140,173	2,936
9	0,740	142,478	2,942
10	0,808	144,990	2,949
11	0,869	147,690	2,957
12	0,924	150,557	2,965
13	0,972	153,567	2,974
14	1,012	156,697	2,983
15	1,045	159,922	2,993
16	1,069	163,217	3,003

Продолжение таблицы 2.7

17	1,086	166,557	3,014
18	1,094	169,915	3,024
19	1,094	173,266	3,036
20	1,086	176,584	3,047
21	1,069	179,843	3,058
22	1,045	183,020	3,069
23	1,012	186,089	3,081
24	0,972	189,029	3,091
25	0,924	191,818	3,102
26	0,869	194,435	3,112
27	0,808	196,862	3,121
28	0,740	199,081	3,130
29	0,667	201,077	3,138
30	0,589	202,835	3,145
31	0,506	204,343	3,152
32	0,419	205,591	3,157
33	0,329	206,571	3,161
34	0,237	207,276	3,164
35	0,143	207,701	3,166
36	0,048	207,843	3,166

Изменение температурного состояния теплоносителя по длине кассеты приводило к изменению плотности и, следовательно, скорости движения теплоносителя:

$$v_i = \frac{G}{F_i \cdot \rho_i}, \quad (2.56)$$

где F_i – площадь проходного сечения кассеты, м²;

ρ_i – плотность теплоносителя на i -м участке, кг/м³.

Функция $\rho = f(t)$ табулирована, а температура теплоносителя на всех участках определена. Площадь поперечного сечения прохода теплоносителя определялась как:

$$F = S_{mk} - \pi \cdot n_{твэл} \cdot R_{тв.внеш}^2 = 0,00479 - 3,14 \cdot 312 \cdot 0,00455^2 = 0,027575 \text{ м}^2.$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.7 и в виде гистограммы в приложении Г рисунок Г.2.

2.10.4 Расчет коэффициентов теплоотдачи с поверхности ТВЭЛ

Для расчета локальных значений коэффициентов теплоотдачи использовались следующие соотношения:

$$\alpha_0^i = \frac{\lambda_i \cdot Nu_i}{d_i}, \quad (2.57)$$

$$d_i = \frac{4 \cdot F_i}{\Pi_i}, \quad (2.58)$$

где Nu_i – критерий Нуссельта;

λ_i – коэффициент теплопроводности теплоносителя на i -м участке, Вт/(м·К);

d_i – эквивалентный диаметр теплоносителя на i -м участке, м;

Π_i – периметр кассеты, омываемый на i -м участке теплоносителем, м.

$$\Pi = \Pi_{TK} + 2 \cdot \pi \cdot n_{твэл} \cdot R_{тв.внеш} = 0,8144 + 2 \cdot 3,14 \cdot 312 \cdot 0,00455 = 9,73401 \text{ м}.$$

Эквивалентный диаметр теплоносителя:

$$d_i = \frac{4 \cdot 0,027575}{9,73401} = 0,011331 \text{ м}.$$

Критерий Нуссельта рассчитывался по формуле (2.59):

$$Nu_i = 0,073 \cdot Re_i^{0,6} \cdot Pr_i^{0,3}, \quad (2.59)$$

где Re_i и Pr_i – критерии Рейнольдса и Прандтля соответственно.

Значения Re_i и Pr_i определялись с использованием соотношений:

$$Re_i = \frac{v_i \cdot d_i}{\nu_i}, \quad (2.60)$$

$$Pr_i = \frac{\nu_i}{\alpha_i}, \quad (2.61)$$

где ν_i – кинематическая вязкость, м²/с;

α_i – коэффициент температуропроводности теплоносителя, м²/с.

Результаты расчета критерия Нуссельта представлены в приложении Ж.

Коэффициент теплоотдачи на i -м участке определялся по формуле (2.62):

$$a_i = a_0^i \cdot \varepsilon_{zi} \cdot \varepsilon_{qi}, \quad (2.62)$$

где ε_{zi} – коэффициент, учитывающий влияние гидравлической стабилизации:

$$\varepsilon_{zi} = \begin{cases} 1,57 & , \quad \frac{z_c}{d_i} \leq 0,05 \\ 0,86 + 0,54 \cdot \left(\frac{d_i}{z_c} \right)^{0,4} & , \quad 0,5 \leq \frac{z_c}{d_i} \leq 30, \\ 1 & , \quad \frac{z_c}{d_i} > 30 \end{cases} \quad (2.63)$$

где $z_c = z_i - z_{м.с}$ – расстояние от данного участка до ближайшего местного сопротивления, расположенного выше по течению.

ε_{qi} – поправка на тепловую стабилизацию, которая вычислялась по соотношению:

$$\varepsilon_{qi} = \frac{q_{si}}{q_i}, \quad (2.64)$$

$$q_1 = q_s^{\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z_i}{H_{a.з.}}\right) \cdot \left(\frac{6 \cdot d_i}{\Delta z^*} + 1\right)^{-1}, \quad (2.65)$$

$$q_i = q_s^{\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z_i}{H_{a.з.}}\right) \cdot \left(\frac{3 \cdot d_i}{\Delta z^*} + 1\right)^{-1}, \quad (2.66)$$

где Δz^* – расстояние от местного сопротивления до середины данного участка кассеты, м.

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи представлены в приложении Д в таблицах Д.1 и Д.2.

2.10.5 Расчет температурного состояния на поверхности твэла и топливной таблетки

Температура поверхности твэл на i -м участке определялась соотношением:

$$t_{нов.i} = t_i + \frac{q_{si}}{a_i}. \quad (2.67)$$

Температура на поверхности топливной таблетки определялась соотношением:

$$t_{н.ТТi} = t_{нов.i} + \Delta t_i, \quad (2.68)$$

где Δt_i – перепад температуры на оболочке твэл.

Для цилиндрического твэл:

$$\Delta t_i = \frac{q_{si}}{\lambda_{об}(t_{нов.i})} \cdot R_{твэл\text{внеш.}} \cdot \ln \frac{R_{твэл\text{внеш.}}}{R_{твэл\text{внут.}}}, \quad (2.69)$$

где $\lambda_{об}(t_{нов.i})$ – коэффициент теплопроводности материала оболочки при температуре $t_{нов.i}$ [17].

Результаты расчетов представлены в таблице 2.8

Таблица 2.8 – Результаты расчета температур поверхности твэла и топливной таблетки

i	$t_{нов.i}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_i, ^\circ\text{C}$	$t_{н.ТТi}, ^\circ\text{C}$
1	135,68	2,46	138,15
2	157,67	7,41	165,09
3	178,94	12,35	191,30
4	200,23	17,24	217,47
5	221,18	22,01	243,20
6	241,57	26,63	268,20
7	261,19	31,04	292,23
8	279,87	35,20	315,07
9	297,45	39,08	336,53

Продолжение таблицы 2.8

10	313,83	42,63	356,46
11	328,87	45,85	374,72
12	342,50	48,69	391,19
13	354,62	51,15	405,78
14	365,19	53,22	418,41
15	374,16	54,87	429,03
16	381,49	56,11	437,60
17	387,16	56,93	444,09
18	391,15	57,32	448,48
19	393,49	57,30	450,79
20	394,16	56,86	451,02
21	393,18	56,00	449,18
22	390,59	54,73	445,32
23	386,42	53,05	439,47
24	380,69	50,98	431,67
25	373,48	48,53	422,00
26	364,82	45,70	410,52
27	354,80	42,52	397,31
28	343,48	39,00	382,48
29	330,93	35,18	366,11
30	317,26	31,07	348,32
31	302,55	26,71	329,25
32	286,89	22,13	309,02
33	270,41	17,38	287,79
34	253,20	12,50	265,70
35	235,39	7,52	242,91
36	217,10	2,51	219,61

Изменение температуры оболочки и поверхности топливной таблетки в зависимости от длины топливного канала представлена в графическом виде в приложении Е на рисунках Е.1 и Е.2.

2.10.6 Распределение температуры по радиусу топливной таблетки

Для цилиндрической топливной таблетки, расположенной в твэле на i -м участке, распределение температуры по радиусу описывалось соотношением:

$$t_{TTi}(r) = t_{n.TTi} + \frac{q_{vi}}{4 \cdot \lambda_{mon}(t_{n.TTi})} \cdot (R_{TT}^2 - r^2), \quad (2.70)$$

где $\lambda_{mon}(t_{нов.i})$ – коэффициент теплопроводности топлива при температуре $t_{n.TTi}$;

r – текущее значение координаты, м.

Результаты расчета представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Распределение температуры по радиусу и длине топливного канала, °C

i	r , м			
	0,003665	0,0027	0,0017	0,0007
1	139,13	147,28	153,11	156,30
2	168,14	193,40	211,50	221,37
3	196,54	239,86	270,90	287,83
4	224,99	287,20	331,76	356,07
5	253,08	334,79	393,32	425,25
6	280,49	382,08	454,86	494,56
7	306,94	428,55	515,66	563,18
8	332,18	473,64	574,98	630,26
9	355,99	516,85	632,08	694,93
10	378,17	557,66	686,24	756,37
11	398,56	595,61	736,77	813,76
12	416,99	630,24	783,01	866,33
13	433,34	661,15	824,34	913,36
14	447,50	687,98	860,25	954,21
15	459,40	710,43	890,26	988,35
16	468,96	728,25	913,99	1015,30
17	476,15	741,24	931,14	1034,72
18	480,94	749,27	941,50	1046,35

Продолжение таблицы 2.9

19	483,33	752,31	944,99	1050,09
20	483,32	750,31	941,58	1045,90
21	480,92	743,34	931,32	1033,86
22	476,21	731,54	914,44	1014,21
23	469,21	715,05	891,16	987,22
24	459,99	694,12	861,83	953,31
25	448,66	669,02	826,88	912,99
26	435,29	640,08	786,78	866,80
27	420,01	607,67	742,09	815,42
28	402,95	572,17	693,40	759,52
29	384,23	534,02	641,32	699,84
30	364,01	493,63	586,50	637,15
31	342,44	451,49	529,60	572,21
32	319,71	408,02	471,28	505,79
33	295,98	363,69	412,19	438,65
34	271,44	318,92	352,94	371,49
35	246,28	274,14	294,10	304,99
36	220,70	229,75	236,23	239,76

Изменения температуры поверхности и центра топливной таблетки представлены в графическом виде в приложении Е на рисунке Е.2. Из полученных значений видно, что превышение температуры плавления материала топлива, равной 2800 °С, по всему объему топливного столба отсутствует.

2.10.7 Гидравлический расчет топливного канала

Для прокачки теплоносителя через кассету реактора с необходимой скоростью следовало создать соответствующий перепад давления.

Для расчета гидравлического сопротивления кассеты использовалась формула:

$$\Delta P = \sum \Delta P_{Ti} + \sum \Delta P_{Mj}, \quad (2.71)$$

где ΔP_{Ti} – сопротивление трения на i -м участке кассеты;

ΔP_{Mj} – местное сопротивление (входные и выходные устройства, сужения, дистанцирующие решетки, изгибы).

Было принято, что в топливном канале местные сопротивления в виде дистанционирующих решеток отсутствовали.

Сопротивление трения на i -м участке:

$$\Delta P_{Ti} = \frac{\xi_i \cdot \Delta z}{d_i} \cdot \left(\frac{\rho_i \cdot v_i^2}{2} \right), \quad (2.72)$$

где ξ_i – коэффициент трения на i -м участке.

Коэффициент трения в пучках ТВЭЛ (для треугольной решетки):

$$\xi_i = \xi_{mp} \cdot (0,57 + 0,18 \cdot (x - 1) + 0,53 \cdot (1 - e^{-a})), \quad (2.73)$$

где ξ_{mp} – коэффициент трения для круглой трубы:

$$\xi_{mp} = \frac{1}{(1,82 \cdot \lg(\text{Re}_i) - 1,64)^2}; \quad (2.74)$$

$x = 1,4$ – отношение расстояния между центрами соседних ТВЭЛ к диаметру ТВЭЛ;

$$a = \begin{cases} 0,58 \cdot (1 - e^{-70 \cdot (x-1)}) + 9,2 \cdot (x-1), & x \leq 1,02 \\ 0,58 + 9,2 \cdot (x-1), & x > 1,02 \end{cases}, \quad (2.75)$$

$$a = 0,58 + 9,2 \cdot (1,4 - 1) = 4,28022.$$

Результаты расчета перепада давлений на различных участках топливного канала представлены в таблице 2.10

Таблица 2.10 – Результаты расчета перепадов давлений

i	ξ_i	ΔP_{Ti} , Па
1	0,019391	683,15
2	0,019376	682,92
3	0,019353	682,54
4	0,019321	682,02
5	0,019280	681,38

Продолжение таблицы 2.10

6	0,019232	680,65
7	0,019176	679,82
8	0,019115	678,94
9	0,019048	678,02
10	0,018977	677,10
11	0,018903	676,18
12	0,018826	675,31
13	0,018747	674,48
14	0,018667	673,72
15	0,018588	673,06
16	0,018509	672,49
17	0,018431	672,02
18	0,018354	671,65
19	0,018280	671,41
20	0,018209	671,27
21	0,018140	671,23
22	0,018076	671,29
23	0,018014	671,43
24	0,017957	671,64
25	0,017904	671,93
26	0,017855	672,25
27	0,017810	672,60
28	0,017770	672,98
29	0,017734	673,35
30	0,017703	673,71
31	0,017677	674,04
32	0,017655	674,32
33	0,017639	674,56
34	0,017626	674,73
35	0,017619	674,84
36	0,017617	674,87

Эпюр перепадов давлений представлен в приложении Ж на рисунке Ж.1.

Подставляя в формулу сопротивления трения, а также местные сопротивления получено:

$$\Delta P = \sum \Delta P_{Ti} = 24307,89 \text{ Па.}$$

Был принят КПД насоса равным 95 %. Тогда затраты мощности на прокачку теплоносителя равны:

$$N_{тн} = \frac{n_{кассет} \cdot G \cdot \Delta P}{\eta \cdot \rho} = \frac{175 \cdot 75,6117 \cdot 24307,89}{0,95 \cdot 904,23} = 0,37 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Доля затрат на прокачку теплоносителя от вырабатываемой тепловой мощности реактора составила 0,01 %.

2.10.8 Оценка критических тепловых потоков

В реакторах, охлаждаемых водой, с целью обеспечения безопасности производился расчет критических тепловых потоков $q_{si}^{крит}$. Если $q_{si}^{крит} > q_{si}$, то кризис теплоотдачи отсутствует.

Критический тепловой поток в водном теплоносителе, и цилиндрических твэл, определялся по формуле:

$$q_{si}^{крит} = 41300 \cdot (v_i \cdot \rho_i)^{0,5} \cdot \Delta t_n^{0,33} \cdot \left(\frac{V'}{V'' - V'} \right), [\text{Вт/м}^2], \quad (2.76)$$

где $V' = 0,001693 \text{ м}^3/\text{кг}$ и $V'' = 0,009607 \text{ м}^3/\text{кг}$ – удельные объемы воды и пара при температуре кипящей воды t_s при заданном давлении (15,7 МПа);

$$\Delta t_n = t_s - t_{вых} = 345,826 - 208 = 137,826 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Результаты расчета тепловых потоков приведено в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Результаты расчета критического теплового потока

i	$q_{si}^{крит}, \text{МВт/м}^2$	$q_{si}, \text{МВт/м}^2$	$\Delta q_{si}, \text{МВт/м}^2$
1	2,351	0,065	2,286
2	2,351	0,194	2,157
3	2,351	0,321	2,030
4	2,351	0,446	1,905

Продолжение таблицы 2.8

5	2,351	0,568	1,783
6	2,351	0,685	1,666
7	2,351	0,797	1,554
8	2,351	0,903	1,448
9	2,351	1,003	1,349
10	2,351	1,094	1,257
11	2,351	1,177	1,174
12	2,351	1,252	1,100
13	2,351	1,316	1,035
14	2,351	1,371	0,980
15	2,351	1,415	0,936
16	2,351	1,449	0,902
17	2,351	1,471	0,880
18	2,351	1,483	0,869
19	2,351	1,483	0,869
20	2,351	1,471	0,880
21	2,351	1,449	0,902
22	2,351	1,415	0,936
23	2,351	1,371	0,980
24	2,351	1,316	1,035
25	2,351	1,252	1,100
26	2,351	1,177	1,174
27	2,351	1,094	1,257
28	2,351	1,003	1,349
29	2,351	0,903	1,448
30	2,351	0,797	1,554
31	2,351	0,685	1,666
32	2,351	0,568	1,783
33	2,351	0,446	1,905
34	2,351	0,321	2,030
35	2,351	0,194	2,157
36	2,351	0,065	2,286

Из полученных результатов видно, что условие $q_{si}^{крит} > q_{si}$, выполнялось на всех участках топливного канала, что свидетельствовало об отсутствии кризиса теплосъема и безопасности эксплуатации данного реактора.

2.10.9 Расчет термического напряжения в материалах твэлов

Для расчета величины термических напряжений в оболочке твэл использовалось выражение:

$$\sigma_{оби} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t_i}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot \left(1 + \frac{m}{6 + 3 \cdot m} \right), \quad (2.77)$$

где α – коэффициент линейного теплового расширения ($1,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) [18];

E – модуль Юнга (70 ГПа) [19];

ν – коэффициент Пуассона (0,33) [20];

$$m = 1 - \frac{R_{\text{твел внутр.}}}{R_{\text{твел внеш.}}}.$$

Результаты расчета термических напряжений в оболочке твэла представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12– Изменение термических напряжений в оболочке твэл по длине топливного канала

i	$\sigma_{оби}$, МПа
1	2,103
2	6,330
3	10,550
4	14,720
5	18,797
6	22,738
7	26,504
8	30,058
9	33,369
10	36,407
11	39,151
12	41,581

Продолжение таблицы 2.12

13	43,681
14	45,442
15	46,854
16	47,911
17	48,611
18	48,950
19	48,931
20	48,552
21	47,819
22	46,734
23	45,303
24	43,535
25	41,438
26	39,024
27	36,307
28	33,305
29	30,038
30	26,529
31	22,806
32	18,899
33	14,842
34	10,670
35	6,423
36	2,141

Предел прочности для сплава Э-110 для данных рабочих температур составляет 204 Мпа [21, 22]. Сравнение полученных значений напряжений с пределом прочности показало, что оболочки сохраняли свою целостность при работе на номинальных параметрах.

Нормальные компоненты термомеханического напряжения в топливных таблетках определялись с использованием соотношений:

$$\sigma_{rri} = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{mon} \cdot (1 - \nu)} \cdot (r_{TT}^2 - R_{TT}^2), \quad (2.78)$$

$$\sigma_{\theta\theta i} = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{mon} \cdot (1 - \nu)} \cdot (3 \cdot r_{TT}^2 - R_{TT}^2), \quad (2.79)$$

$$\sigma_{zzi} = \frac{\alpha \cdot E \cdot q_{vi}}{16 \cdot \lambda_{mon} \cdot (1 - \nu)} \cdot (4 \cdot r_{TT}^2 - 2 \cdot R_{TT}^2), \quad (2.80)$$

где λ_{mon} – коэффициент теплопроводности топлива, который берется для среднего (между центром и поверхностью ТТ) значения температуры;

α – коэффициент линейного теплового расширения ($10^{-5}1/^\circ\text{C}$);

E – модуль Юнга (44 ГПа);

ν – коэффициент Пуассона (0,27).

Результаты расчета представлены в таблице 2.13.

Предельно допустимое напряжение в топливных таблетках составляет 9,0 МПа.

Таблица 2.13 – Изменение термических напряжений в топливной таблетке по длине топливного канала

i	σ_{rri} , МПа	$\sigma_{\theta\theta i}$, МПа	σ_{zzi} , МПа
1	-2,735	-2,539	-5,274
2	-2,834	-2,631	-5,465
3	-2,931	-2,722	-5,653
4	-3,030	-2,813	-5,842
5	-3,127	-2,903	-6,030
6	-3,222	-2,991	-6,214
7	-3,315	-3,077	-6,392
8	-3,403	-3,159	-6,562
9	-3,487	-3,237	-6,724
10	-3,565	-3,310	-6,875
11	-3,637	-3,377	-7,014
12	-3,703	-3,438	-7,141
13	-3,761	-3,492	-7,253
14	-3,812	-3,539	-7,351

Продолжение таблицы 2.13

15	-3,855	-3,579	-7,433
16	-3,889	-3,611	-7,500
17	-3,916	-3,635	-7,551
18	-3,933	-3,652	-7,585
19	-3,943	-3,660	-7,603
20	-3,944	-3,661	-7,605
21	-3,936	-3,654	-7,591
22	-3,921	-3,640	-7,560
23	-3,897	-3,618	-7,515
24	-3,865	-3,589	-7,454
25	-3,826	-3,552	-7,379
26	-3,780	-3,510	-7,290
27	-3,727	-3,460	-7,188
28	-3,668	-3,406	-7,074
29	-3,603	-3,345	-6,949
30	-3,533	-3,280	-6,813
31	-3,458	-3,211	-6,669
32	-3,380	-3,138	-6,517
33	-3,297	-3,061	-6,359
34	-3,213	-2,983	-6,195
35	-3,126	-2,902	-6,028
36	-3,038	-2,820	-5,858

На основании полученных результатов можно было сделать вывод о том, что рассмотренные условия эксплуатации топлива соответствовали требованиям в области надежности ядерной установки [23].

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Выполнение грамотной научно-исследовательской работы требует наличия экономической оценки всех её элементов: как объекта исследования, так и методов, которые для этого используются. Цель данного раздела ВКР заключается в оценке конкурентоспособности и ресурсоэффективности научной разработки ядерного реактора типа ВВЭР с тепловой мощностью 3000 МВт и изменением температуры теплоносителя в активной зоне от 131°C до 208 °C. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- выявить потенциальных потребителей;
- произвести анализ конкурентных технических решений;
- произвести SWOT-анализ;
- выявить структуру работ и их исполнителей;
- определить трудоемкость проводимых работ;
- разработать график проведения исследования;
- рассчитать размер бюджета исследования;
- оценить экономическую эффективность проекта.

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Современные мировые тенденции определяют вектор развития любой технологической, научной и прочих отраслей. Особенно сильно поднимается вопрос о необходимости планирования и организации всех проводимых работ, а именно – с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Таким образом, существует потребность в определении затрат на проведение научно-исследовательских работ и их продолжительности, что, в свою очередь, определяет экономическую эффективность и конкурентоспособность рассматриваемого в данной работе реактора типа ВВЭР.

Полученные результаты расчета характеристик реактора ВВЭР в процессе расчёта данной работы определяют назначение исследуемого реактора как энергетической и промышленной установки. Целевыми потребителями данного проекта могут быть только крупные корпорации (в том числе и государственные), так как установка слишком ресурсоёмкая, чтобы быть доступной для эксплуатации даже крупным научным центром (за исключением тех, которые напрямую зависят от государства или упомянутых крупных компаний).

Рынок услуг по разработке ЯЭУ можно сегментировать по множеству критериев, основными из которых являются уровень развития атомной энергетики страны и электрическая мощность установки (рисунок 3.1).

		Энергетическая мощность установки		
		До 440 МВт	От 440 МВт до 1000 МВт	От 1000 МВт до 1800 МВт
Уровень развития атомной энергетики	Высокий			
	Средний			
	Низкий			

Рисунок 3.1 – Карта сегментирования рынка услуг по ЯЭУ

Мощность исследуемого реактора ВВЭР позволяет отнести его к сегменту рынка реакторов с энергетической мощностью установки от 1000 МВт до 1800 МВт. Данный реактор может быть востребован в странах, обладающих средним или высоким уровнем развития атомной энергетики.

3.2 Анализ конкурентных технических решений

Выполнение представленной работы основывается на рассмотрении реактора типа ВВЭР. Он является, в первую очередь, энергетическим, что позволяет его сравнить с другими энергетическими установками отрасли:

уран-графитовый каналный реактором с водяным теплоносителем (РБМК) и реактором на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (БН).

Российские разработки являются опорными в данном оценочном исследовании вследствие их наибольшей востребованности на международном рынке и невозможности построения зарубежных аналогов на территории РФ.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (3.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. В таблице 3.1 представлена оценочная карта конкурентоспособности различных характеристик, упомянутых реакторов, где $B_{БН}$ – БН-800, $B_{Р}$ – РБМК-1500, $B_{В}$ – ВВЭР.

Таблица 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _{БН}	Б _Р	Б _В	К _{БН}	К _Р	К _В
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Возможность перегрузки топлива без останова реактора	0,1	2	5	2	0,2	0,5	0,2
2. Необходимость специализированного оборудования для обеспечения необходимых параметров теплоносителя	0,04	4	5	4	0,16	0,2	0,16
3. Глубина выгорания и возможность её увеличения	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75
4. Удобство в эксплуатации	0,05	3	3	5	0,15	0,15	0,25
5. Надежность	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75

Продолжение таблицы 3.1

6. Уровень шума	0,01	4	4	4	0,04	0,04	0,04
7. Безопасность	0,2	5	4	5	1	0,8	1
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,01	3	4	5	0,03	0,04	0,05
2. Стоимость топлива в зависимости от обогащения по изотопу U^{235}	0,04	3	5	4	0,12	0,2	0,16
3. Стоимость материалов	0,04	3	4	5	0,12	0,16	0,2
4. Уровень проникновения на рынок	0,01	1	4	5	0,01	0,04	0,05
5. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
6. Послепродажное обслуживание	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
Итого	1	46	54	59	4,13	4,13	4,61

Предоставленные выше данные позволяют провести анализ конкурентоспособности ЯЭУ, представленной в данной работе. Видно, что совокупность преимуществ, которыми обладает реактор типа ВВЭР, обеспечивает ему наиболее высокую конкурентоспособность, что и обуславливает распространенность данного типа реакторных установок.

3.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильными сторонами могут являться факторы, которые отражают наиболее конкурентоспособную сторону рассматриваемой установки.

Сильными сторонами экспериментальной ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности:

- использование проверенных и отработанных технических решений в конструкции реактора;
- дешевизна используемых материалов;
- эффективное использование ядерного топлива;
- повышенная безопасность, обусловленная свойствами реактора;
- снижение теплового и радиационного воздействия на окружающую среду.

Слабыми сторонами считаются те особенности рассматриваемого объекта, которые могут препятствовать его наиболее выгодному и беспрепятственному использованию.

Слабыми сторонами рассматриваемой ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности:

- необходимость поддержания высокого давления теплоносителя первого контура;
- невозможность применения традиционных технологий преобразования тепловой энергии в электрическую;
- образование в процессе эксплуатации большого количества высокоактивного облученного ядерного топлива;
- необходимость обогащения топлива по изотопу U^{235} вследствие невозможности работы реактора на топливе с природным изотопным составом.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта.

К возможностям можно отнести:

- политика основного оператора АЭС в России АО «Концерн Росэнергоатом» по повышению экономической и ресурсной эффективности предприятий;
- тенденция повышения требований к уровню безопасности эксплуатируемых ядерных реакторов;

– увеличение требуемого объема производства электрической и тепловой энергии;

– создание новых производств с целью обеспечения населения рабочими местами.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды объекта, что может иметь разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

К угрозам по отношению к рассматриваемому реактору можно отнести:

– природные катаклизмы;

– снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок;

– диверсионные и террористические действия.

В таблице 3.2 представлены результаты SWOT-анализа.

Таблица 3.2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны: С1. Использование проверенных и отработанных технических решений в конструкции реактора; С2. Дешевизна используемых материалов; С3. Эффективное использование ядерного топлива; С4. Повышенная безопасность, обусловленная свойствами реактора; С5. Снижение теплового и радиационного воздействия на окружающую среду.	Слабые стороны: Сл1. Необходимость поддержания высокого давления теплоносителя первого контура; Сл2. Невозможность применения традиционных технологий преобразования тепловой энергии в электрическую; Сл3. Образование в процессе эксплуатации большого количества высокоактивного облученного ядерного топлива;
--	--	---

Продолжение таблицы 3.2

		Сл4. Необходимость обогащения топлива по изотопу U^{235} вследствие невозможности работы реактора на топливе с природным изотопным составом.
<p>Возможности:</p> <p>В1. Политика основного оператора АЭС в России АО «Концерн Росэнергоатом» по повышению экономической и ресурсной эффективности предприятий;</p> <p>В2. Тенденция повышения требований к уровню безопасности эксплуатируемых ядерных реакторов;</p> <p>В3. Увеличение требуемого объема производства электрической и тепловой энергии.</p> <p>В4. Создание новых производств с целью обеспечения населения рабочими местами.</p>	<p>1. Использование отработанных технологий снижает затраты на переналадку производства, что в сумме с малой стоимостью материалов позволяет снизить себестоимость реактора, повышая его экономическую эффективность.</p> <p>2. Эффективное использование топлива повышает ресурсную эффективность установки.</p> <p>3. Свойства реактора позволяют соответствовать как государственным, так и международным стандартам безопасности.</p>	<p>1. Разработка более эффективных методов преобразования тепловой энергии в электрическую;</p> <p>2. Создание производственных высокотехнологичных предприятий по обращению с отработанным ядерным топливом.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Природные катаклизмы.</p> <p>У2. Снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок.</p> <p>У3. Диверсионные и террористические действия.</p>	<p>1. Свойства реактора позволяют предотвратить или минимизировать последствия, которые могут возникнуть в результате нарушения условий нормальной эксплуатации реактора при возникновении ЧС.</p>	<p>1. Повышение обогащения топлива и обеспечение строгих параметров теплоносителя приводит к повышению требований в области ядерной и физической защиты.</p>

Продолжение таблицы 3.2

		2. Снижение государственного финансирования может привести к замедлению или сворачиванию исследований в области альтернативных технологий преобразования энергии.
--	--	---

Проведённый SWOT-анализ позволяет с достаточной для данной работы точностью определять дальнейшее положение рассматриваемого объекта на соответствующем рынке. Рассматриваемый ядерный реактор в связи с отличными характеристиками имеет достаточно устойчивые перспективы для использования в качестве источника тепло- и электроэнергии. Однако потребность в проведении большого объема дополнительных научно-исследовательских работ в области преобразования энергии из тепловой в электрическую является серьезным препятствием для реализации данного проекта. Выходу исследуемой установки на рынок может поспособствовать крупный первоначальный заказ (десятки блоков), позволяющий снизить среднюю расчетную себестоимость производства, и привлечение крупных инвестиций со стороны государства и потенциальных заказчиков.

3.4 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Данный пункт представляет собой полный перечень проводимых работ, где определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным достаточно объективным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух, предпочтительным является линейный

график. Сведения об этапах проводимой работы и их исполнителях представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Этапы проведенной работы

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 20% И – 100%
Выбор исходных параметров	НР, И	НР – 100% И – 70%
Методика расчета	НР, И	НР – 100% И – 80%
Нейтронно-физический расчет ЯР	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

Как видно из представленной выше таблицы, роль НР в ходе выполнения всех видов работ сводится к направляющей и контролирующей функциям, в то время как И является исполнительным звеном – он выполняет все поставленные задачи для достижения установленной цели.

3.4.1 Продолжительность этапов работ

Продолжительность этапов работ может быть рассчитана с использованием следующих методов:

- технико-экономического;
- опытно-статистического.

Первый метод подразумевает наличие и использование нормативной базы трудоёмкости всех применяемых в работе процессов, так как они по своей

природе являются повторяющимися с достаточно высокой частотой при условии стандартной, устойчивой обстановки. В связи с тем, что подобными нормативами исполнитель не обладает в виду нестандартности и неравномерности распределения рабочих усилий применяется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Способ с применением достаточно актуальных, как с точки зрения времени, так и со стороны реальной применимости аналогов к разрабатываемой НИР имеет ряд преимуществ: он относительно прост в исполнении и не сопряжён с большим количеством затрат. Однако на практике он может быть слишком локальным и применяться только для отдельных элементов – невозможно найти абсолютно идентичных работ.

Второй способ – экспертный – применим в ситуации, когда аналоги выполняемой НИР отсутствуют. Он предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию.

Для определения вероятных значений продолжительности работ $t_{\text{ОЖ}}$ могут применяться следующие формулы:

$$t_{\text{ОЖ}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5}, \quad (3.2)$$

$$t_{\text{ОЖ}} = \frac{t_{\text{min}} + 4 \cdot t_{\text{prob}} + t_{\text{max}}}{6}, \quad (3.3)$$

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, сут.;

t_{max} – максимальная продолжительность работы, сут.;

t_{prob} – наиболее вероятная продолжительность работы, сут.

Как видно из самой конструкции формул, вторая требует большего анализа каждого из элементов работы и вероятностной оценки их продолжительности, что, очевидно, усложняет все

Для выполнения перечисленных в таблице 3.4 работ требуются специалисты:

- инженер (исполнитель ВКР);
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни.

Расчёт продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях:

$$T_{\text{РД}} = \frac{t_{\text{ОЖ}}}{K_{\text{ВН}}} \cdot K_{\text{Д}}, \quad (3.4)$$

где $K_{\text{ВН}}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_{\text{Д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ.

Расчёт продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (3.5)$$

где $T_{\text{КАЛ}}$ – календарные дни;

$T_{\text{ВД}}$ – выходные дни;

$T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни.

При учёте, что $T_{\text{КАЛ}} = 365$ сут., $T_{\text{ВД}} = 52$ сут., $T_{\text{ПД}} = 10$ сут.

В приложении 3 таблице 3.1 приведен расчет продолжительности этапов работ и их трудоёмкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле (3.3). Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоёмкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента $K_{\text{Д}} = 1,15$. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{\text{ОЖ}} \cdot K_{\text{Д}}$. Столбцы 8 и 9 – трудоёмкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на $T_{\text{К}} = 1,212$. Итог по столбцу 5 даёт общую

ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоёмкости для каждого из участников проекта. Величины трудоёмкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов, позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный в приложении И таблице И.1.

3.5 Расчёт накопления готовности проекта

Текущее состояние работы над проектом нуждается в оценке для точного понимания всех затраченных усилий. Получаемые по итогу подобной оценки величины (величины накопления готовности работы) отображают количество процентов, на которое выполнен весь объём работ по проекту в целом по окончании текущего (i -го) этапа.

Вводятся следующие обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$ – общая трудоёмкость проекта;
- TP_i (TP_k) – трудоёмкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;
- TP_i^H – накопленная трудоёмкость i -го этапа проекта по его завершении;
- TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоёмкость работ, выполняемых j -м участником на i -м этапе, здесь $j = \overline{1, 2}$ – индекс исполнителя.

Степень готовности определяется формулой (3.5):

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}}. \quad (3.6)$$

Применительно к таблице, представленной в приложении А, величины TP_{ij} (TP_{kj}) находятся в столбцах (6, $j = 1$) и (7, $j = 2$). Величина $TP_{\text{общ}}$ равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Результаты расчета TP_i (%) и CG_i (%) на основе этих данных содержится в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	TP_i , %	CG_i , %
Постановка задачи	3,74	3,74

Продолжение таблицы 3.4

Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	7,05	10,79
Подбор и изучение материалов по тематике	14,57	25,36
Разработка календарного плана	4,11	29,47
Обсуждение литературы	4,48	33,94
Выбор исходных параметров	12,69	49,64
Методика расчета	20,16	66,80
Нейтронно-физический расчет	17,08	83,87
Оформление расчетно-пояснительной записки	6,40	90,28
Оформление графического материала	3,74	94,04
Подведение итогов	5,99	100,00

Очевидно, что наибольшее количество трудозатрат приложено на этапах проработки методики расчёта и при его непосредственном осуществлении (порядка половины всей работы), когда как этапы, включающие подбор и оформление различного рода документов, подготовку необходимой базы для проведения практических изысканий по отдельности потребовали меньше времени и сил.

3.6 Расчёт сметы на выполнение проекта

Смета на выполнение данного исследования содержит все расходы, необходимые для осуществления комплекса работ, необходимых для реализации всего спектра поставленных перед проектом задач. Расчёт полной (сметной) стоимости выполнения исследования производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;

- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

Полная стоимость выполняемых работ равняется сумме затрат по всем представленным выше статьям [24].

3.6.1 Расчёт затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает, так называемые, транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (транзакции). Приблизённо они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %.

Результаты расчета затрат на материалы без учета транзакций, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	260	1 уп.	260
Картридж для принтера	1040	1 шт.	1040
Итого:			1300

В данной работе принимается, что транзакционные расходы составляют 5 % от отпускной цены материалов.

$$C_{\text{МАТ}} = 1300 \cdot 1,05 = 1365 \text{ руб.}$$

Таким образом затраты на материалы и оборудование равны 1365 рублей.

3.6.2 Расчёт заработной платы

Данная статья расходов включает в себя суммарную заработную плату научного руководителя и инженера (исполнителя), с учётом входящих в фонд заработной платы различных премий. Основная заработная плата рассчитывается, опираясь на трудоёмкость выполнения каждого этапа и на величину месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083}, \quad (3.7)$$

где 25,083 сут. – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей неделе.

Результаты расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.6. Затраты времени каждым исполнителем в рабочих днях с округлением до целого взяты из приложения А. Учёт всевозможных премий и районной надбавки осуществляется путём использования ряда коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,3$; $K_{\text{ДОП.ЗП}} = 1,20$; $K_{\text{Р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{ДОП.ЗП}} \cdot K_{\text{Р}}; \quad (3.8)$$

$$K_{\text{И}} = 1,3 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 2,028.$$

Результаты расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{и}}$	Фон з/п, руб.
НР	35120	1400,15	17	2,028	48271,57
И	12130	483,59	26	2,028	25498,73
Итого:					73770,30

Таким образом, суммарные затраты на заработную плату участникам исследования составили 73770,30 рублей.

3.6.3 Расчёт затрат на страховые взносы

Затраты на страховые взносы, включающие в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование согласно ФЗ от 24.07.2009 № 212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2 %.

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,302; \quad (3.9)$$

$$C_{\text{соц}} = 73770,30 \cdot 0,302 = 22278,63 \text{ руб.}$$

Таким образом, размер отчислений во внебюджетные фонды составили 22278,63 рублей. Данные взносы идут в Фонд государственного социального страхования, Пенсионный фонд и Фонд медицинского страхования.

3.6.4 Расчёт затрат на электроэнергию

Данные расходы подразумевают затраты на то количество электроэнергии, которая потрачена для выполнения всего проекта, то есть на работу используемого оборудования. Они рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (3.10)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $C_{\text{э}} = 5,748 \text{ руб./кВт·час (с НДС)}$.

Время работы оборудования рассчитывается на основе суммарной трудоёмкости работ из приложения А для исполнителя ($T_{\text{рд}}$) при условии, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (3.11)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$.

В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об}}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_c, \quad (3.12)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_c \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности $K_c = 1$.

Результаты расчета затрат на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{об}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{об}}$, кВт	Затраты $C_{\text{эл.об}}$, руб.
Персональный компьютер	192	0,3	331,1
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			332,25

Таким образом, затраты на оплату потребленного количества электроэнергии составляют 332,25 руб.

3.6.5 Расчёт амортизационных расходов

Данная статья подразумевает расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{\text{AM}} = \frac{H_{\text{A}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (3.13)$$

где H_{A} – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{Д}}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{\text{ОБ}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Для персональной электронно-вычислительной машины в 2020 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне, $F_{\text{Д}}$ равен:

$$F_{\text{Д}} = 298 \cdot 8 = 2384 \text{ ч}$$

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

H_{A} равна:

$$H_{\text{A}} = \frac{1}{2,5} = 0,4.$$

С учетом значений всех коэффициентов амортизационные расходы равны:

$$C_{\text{AM}} = \frac{0,4 \cdot 208 \cdot 100000 \cdot 1}{2384} = 3489,93 \text{ руб.}$$

Таким образом, суммарные амортизационные отчисления равны 3489,93 рублей.

3.6.6 Расчёт прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражаются расходы на выполнение проекта, которые не могут быть учтены в предыдущих статьях или же которые не могут быть предвидены. Размер прочих расходов принимается равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{СОЦ}} + C_{\text{ЭЛ.ОБ}} + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,1. \quad (3.14)$$

Прочие расходы при выполнении исследований равны:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (1365 + 73770,30 + 22278,63 + 332,25 + 3489,93) \cdot 0,1 = \\ = 10123,61 \text{ руб.}$$

Таким образом, прочие расходы составили 10123,61 рубля.

3.6.7 Расчёт суммарной себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Нейтронно-физический расчет реактора типа ВВЭР» (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма	
		, руб.	, %
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	1365,00	1,23
Основная заработная плата	$C_{\text{ЗП}}$	73770,30	66,25
Страховые взносы	$C_{\text{СОЦ}}$	22278,63	20,01
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$	332,25	0,30
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	3489,93	3,13
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	10123,61	9,09
Итого:		111359,72	100

Таким образом, затраты на разработку составили 111359,72 руб. Проведение анализа вклада каждой из статей в суммарные затраты на работу выявило, что основной вклад вносят отчисления на заработную плату участников проекта, когда как расходы на материалы и обеспечение электроэнергией практически не повлияли на финальную величину.

3.6.8 Расчёт прибыли

Ввиду отсутствия данных, прибыль G рассчитана как 20 % от полной себестоимости проекта:

$$G = C \cdot 0,2; \quad (3.15)$$

$$G = 111359,72 \cdot 0,2 = 22271,94 \text{ руб.}$$

Таким образом, размер прибыли составил 22271,94 рублей.

3.6.9 Расчёт НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (3.16)$$

$$\text{НДС} = (111359,72 + 22271,94) \cdot 0,2 = 26726,33 \text{ руб.}$$

Таким образом, размер НДС составил 26726,33 рублей.

3.6.10 Цена разработки проекта

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (3.17)$$

$$C_{\text{НИР}} = 111359,72 + 22271,94 + 26726,33 = 160357,99 \text{ руб.}$$

Таким образом, полная цена проекта равна 160357,99 рублей.

3.6.11 Оценка экономической эффективности проекта

Ввиду закрытости или отсутствия данных по реактору типа ВВЭР и устройствам для преобразования энергии оценка экономической эффективности и определение срока окупаемости данного проекта невозможны.

В ходе работы над разделом «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» получены следующие результаты:

– оценка конкурентоспособности исследуемого реактора и проведение SWOT-анализа показали, что совокупность преимуществ, которыми он обладает, обеспечивает ему высокую конкурентоспособность и устойчивые перспективы для использования в качестве источника тепло- и электроэнергии. Однако для выхода на рынок необходимо проведение дополнительных

исследований, стоимость которых из расчета на один энергоблок может быть снижена в случае наличия крупного первоначального заказа.

– затраты на настоящее исследование практически не отличаются от затрат, которые осуществляются в ходе стандартной работы научного руководителя и исполнителя, не связанных с вовлечением в различные научные изыскания, за исключением расходов, связанных с проработкой проекта, а именно: часть налогов (НДС), прибыль и прочие расходы.

– бюджет научно-технического исследования составил 160357,99 рублей. Бюджет НТИ состоит из материальных затрат (1365,00 руб.), амортизационных отчислений (3489,93 руб.), затрат на оплаты труда (73770,30 руб.), оплату страховых взносов (22278,63 руб.) и прочих расходов (10123,61 руб.).

– оценка экономической эффективности не проведена по причине закрытости или отсутствия данных по ВВЭР и устройствам преобразования энергии.

4 Социальная ответственность

Ядерный реактор представляет собой высокотехнологичное устройство, позволяющее получать колоссальное количество энергии, потребляемое как крупными промышленными предприятиями, так и населением. При этом вред, наносимый окружающей среде, значительно снижается по сравнению с использованием традиционной тепловой энергетики, что повышает перспективность и актуальность данной технологии.

Проектирование и эксплуатация ядерных реакторов являются наукоемкими областями деятельности, требующими объединения большого количества высококлассных специалистов из различных областей науки, что позволяет обеспечить их рабочими местами.

Определение нейтронно-физических характеристик реактора позволяет оценить безопасность и экономическую эффективность его эксплуатации, а также выявить основные направления работ по нахождению конкретных технических решений, которые будут использованы при проектировании конструкции реактора. В связи с этим обеспечение охраны труда специалиста в ходе проведения им данной деятельности является важной задачей, от решения которой зависят здоровье и жизнь персонала.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

С целью обеспечения охраны труда работодателем должны создаваться соответствующие условия труда, обеспечивающие минимальное влияние вредных и опасных факторов на работника, а также сохранение его

максимальной работоспособности. Данные условия регулируются соответствующим трудовым законодательством.

4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Основным законом, регулирующим взаимоотношения между работодателем и работником, а также условия труда, является Трудовой Кодекс Российской Федерации [25].

Работы по теоретическому определению нейтронно-физических характеристик ядерного реактора можно отнести к офисной работе с применением персональной электронно-вычислительной машины. Данный вид деятельности не предполагает работы в ночное время суток и осуществляется в условиях, при которых на работника воздействуют вредные и опасные производственные факторы, уровни воздействия которых не превышают предельно допустимых значений, установленных нормативами условий труда. Согласно Федеральному закону от 28.12.2013 № 426-ФЗ данные условия можно классифицировать как допустимые (2 класс) [26].

Продолжительность рабочего дня и соответствующий размер заработной платы устанавливаются Трудовым договором. Максимальное количество рабочих часов для допустимых условий труда составляет 40 часов в неделю. Размер заработной платы не может быть ниже минимального размера оплаты труда установленного в регионе осуществления деятельности.

Гарантии в области защиты персональных данных работника обеспечиваются главой 14 ТК РФ.

4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Организационные мероприятия при компоновке рабочего места заключаются в размещении основных элементов рабочего места с учетом физиологических особенностей человека, а также характера проводимых на нем работы. Основные требования к рабочему месту при проведении офисных

работ с ПВЭМ сидя представлены в ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Размещение предметов и средств труда, а также рабочей документации должно производиться с учетом зон досягаемости моторного поля работника. Расположение зон досягаемости представлено на рисунке 4.1 [27].

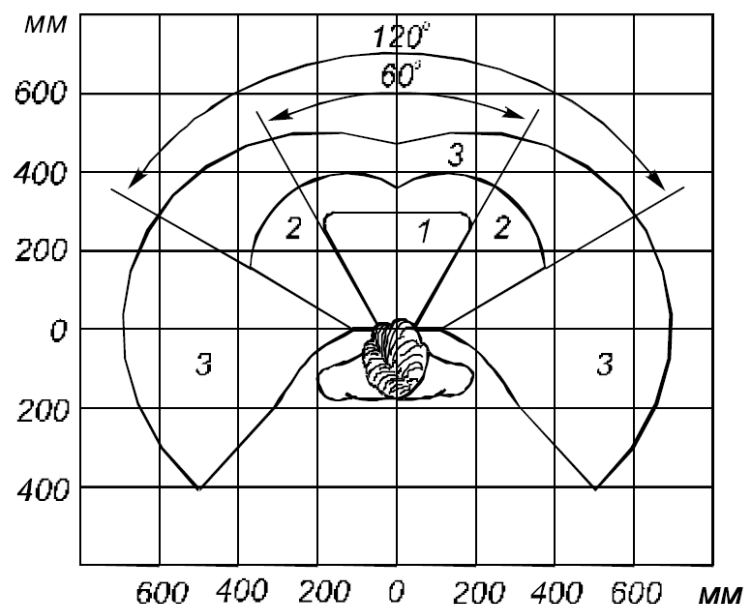


Рисунок 4.1 – Расположение зон досягаемости моторного поля:

1 – оптимальная зона; 2 – зона легкой досягаемости; 3 – зона досягаемости

Оптимальное расположение оборудования и документации при проведении работ:

- дисплей находится в центральной части зоны 3;
- клавиатура размещается в зоне 1;
- системный блок расположен в зоне 2 (слева);
- принтер установлен в зоне 3 (справа);
- документация, необходимая при работе, расположена в зоне 2 (справа).

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 – 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края, обращенного к пользователю, или на

специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы [28].

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400 – 550 мм и углам наклона вперед до 15° и назад до 5°;
- высоту опорной поверхности спинки 300 ± 20 мм, ширину не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости 400 мм;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260 – 400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной 50 – 70 мм.

Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680 – 800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм [28].

4.2 Производственная безопасность

Для обеспечения безопасной работы исследователя необходимо выявить основные вредные и опасные факторы, а также оценить уровень их воздействия путем сравнения с применяемыми нормами.

4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте исследователя

В производственной среде работник подвергается воздействию вредных и опасных факторов, которые могут быть классифицированы по группам

элементов: физические, химические, биологические, социально-экономические и психофизиологические.

Основные опасные и вредные факторы, возникающие при проектировании ядерного реактора, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Опасные и вредные факторы производственной среды

Факторы	Нормативная документация
Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. [29].
Отсутствие или недостаток естественного освещения	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [30]
Механические колебания	СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий [31].
Акустические колебания	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [32].
Неионизирующее электромагнитное излучение	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности [33].
Ионизирующее излучение	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [28].
Психофизиологические факторы	ГОСТ Р 55241.1-2012/ISO/TR 9241-100:2010 Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 100. Введение в стандарты, относящиеся к эргономике программных средств [34]
Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [35].

Основные факторы, влияющие на исследователя в процессе работы, включают в себя: температуру и относительную влажность воздуха, вибрацию, шум, электромагнитные поля низкой частоты, ионизирующее излучение, психофизиологические факторы, статическое электричество и электрический ток.

Отклонение параметров микроклимата от нормальных значений может привести к нарушению теплообмена с окружающей средой и, как следствие, перегреву или переохлаждению организма. Последствиями перегрева являются: обильное потоотделение, учащенное сердцебиение, головокружение, слабость, в тяжелых случаях – тепловой удар. Переохлаждение способно привести к возникновению простудных заболеваний и воспалению мышц и суставов.

Недостаточная освещенность способна привести к нарушению работы зрительных анализаторов и нервной системы, что в свою очередь может привести к падению производительности, травмам и хроническим заболеваниям органов зрения.

Источником шума и вибрации являются движущиеся части системы охлаждения ПЭВМ. Также источниками шума могут быть системы кондиционирования, приборы освещения и внешние источники. Вредное воздействие шума и вибрации на организм приводит к ослаблению внимания, ухудшению памяти, снижению реакции.

Источниками низкочастотного электромагнитного поля являются системный блок и видеомонитор ПЭВМ. Данный фактор оказывает вредное влияние на работу нервной и сердечнососудистой систем.

Видеомонитор является источником мягкого рентгеновского излучения, что может привести к изменению состава крови, увеличению хрупкости сосудов, нарушению работы иммунной системы и др.

Нервно-психические перегрузки, возникающие в ходе проведения работы, включают в себя умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов и монотонность труда исследователя. Данный вредный фактор

может привести к возникновению головных болей, раздражительности, усталости и болезненных ощущений в глазах.

Поражение электрическим током возникает в случае включения исследователя в проводящую сеть и протекания через него электрического тока. При этом на организм оказывается термическое, электролитическое и биологическое действие, заключающееся в нагреве и ожоге участков тела, изменении состава и свойств крови и других биологических жидкостей, раздражении и возбуждении живых тканей, нарушении биоэлектрических процессов.

4.2.2 Мероприятия по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Для сведения действия вредных и опасных факторов на исследователя к минимуму необходимо применение комплекса защитных мер.

Оптимальные параметры микроклимата на рабочем месте соответствуют категории работ по уровню энергозатрат 1б и представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные параметры микроклимата на рабочем месте

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21–23	40–60	0,1
Теплый	22–24	40–60	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. В условиях помещения для работы на ПЭВМ осуществляется естественная вентиляция с обеспечением воздухообмена не менее 40 м³/ч на человека [29]. Поддержание температуры и влажности воздуха осуществляется водяной системой отопления.

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 – 500 лк. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк. Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90 градусов с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м². Коэффициент пульсации не должен превышать 5%. Рекомендуется использовать системы комбинированного освещения [28,30].

Уровень шума при осуществлении офисных работ с использованием ПЭВМ не должен превышать 50 дБА на расстоянии 50 см от источника [32]. Выполнение данного требования может быть осуществлено с применением дополнительной звукоизоляции помещения. Поддержание низкого уровня вибрации осуществляется за счет внутренних систем вибрационной защиты системного блока.

Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более [33]:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц — 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц — 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц– 2 кГц — 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц — 25 нТл.

При этом мощность дозы рентгеновского излучения не должна превышать 1 мкЗв/ч [28].

Способами защиты от воздействия электромагнитного поля и рентгеновского излучения являются увеличение расстояния до источника (не менее 50 см) и использование специальных экранов.

Основными способами снижения воздействия психофизиологических факторов является рациональная организация рабочего места для поддержания оптимальной рабочей позы исследователя, а также правильная организация режима труда и отдыха.

Защита от поражения электрическим током осуществляется за счет принятия мер по обеспечению невозможности протекания электрического тока в местах контакта исследователя с рабочей поверхностью, использования предупреждающих знаков, заземления корпусов всех установок через нулевой провод и обеспечения сокрытия токоведущих частей оборудования в корпусе с обеспечением их изоляции.

4.3 Экологическая безопасность

Важным этапом реализации разрабатываемых проектов является оценка влияния проектного решения на окружающую среду и разработка мер по обеспечению экологической безопасности.

4.3.1 Анализ влияния ядерного реактора на окружающую среду

В ходе эксплуатации ядерного реактора происходит накопление больших объемов радиоактивных отходов, включающих в себя газообразные, жидкие и твердые отходы. Неправильное обращение с ними может повлечь радиоактивное заражение больших территорий, и невозможность их использования в течение десятков лет и больше.

В состав газообразных радиоактивных отходов входят изотопы инертных газов ксенона и криптона, а также аэрозольные летучие соединения йода и цезия. Выход в атмосферу газообразных продуктов деления происходит в результате наличия микротрещин в оболочках ТВЭЛ и разгерметизации первого контура в ходе плановых остановов реактора. Также возможен выход газоаэрозольных продуктов активации, образующихся в первом контуре вследствие утечек. Санитарными правилами проектирования и эксплуатации атомных станций СП АС-03 устанавливается квота на газообразные выбросы в 0,2 мЗв/год.

Жидкими отходами является теплоноситель первого контура, вода бассейна выдержки облученного топлива, дезактивационные растворы и растворы регенерации ионообменных фильтров. СП АЗ-03 устанавливается

квота на выбросы жидких радиоактивных отходов в окружающую среду в 0,05 мЗв/год [36].

В состав твердых радиоактивных отходов входят детали и узлы реакторного оборудования, спецодежда и индивидуальные средства защиты, материалы фильтров.

В процессе работы ядерного реактора образуется большое количество тепловой энергии, способствующее тепловому загрязнению окружающей среды.

4.3.2 Мероприятия по защите окружающей среды

С целью уменьшения выбросов газообразных радиоактивных отходов используются системы спецгазоочистки, включающие в себя задерживающие емкости, которые обеспечивают распад короткоживущих изотопов до выхода в атмосферу, и вентиляционные фильтры.

Правила безопасного обращения с жидкими и твердыми радиоактивными отходами регламентируются Федеральным законом «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации № от 11.07.2011 № 190-ФЗ» и предполагают наличие национального оператора по обращению с радиоактивными отходами [37]. Основными методами по предотвращению влияния отходов на гидросферу и литосферу являются их выдержка, иммобилизация в матрице, устойчивой к радиационному и тепловому воздействию и обеспечивающей химическую инертность при хранении, и заключение в коррозионностойкую оболочку с целью долгосрочного хранения.

Проблема теплового загрязнения может быть решена путем осуществления замкнутого цикла охлаждения или утилизации тепла сторонними потребителями.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В процессе проведения нейтронно-физических расчетов характеристик ядерного реактора имеется вероятность возникновения чрезвычайной

ситуации (ЧС). Поэтому возникает необходимость определить характер возможных ЧС и разработать систему мер по обеспечению безопасности работника.

4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований

По природе происхождения ЧС подразделяются на техногенные, природные, биологические, социальные и экологические. В процессе проведения расчетов возможно возникновение следующих ЧС:

- техногенного характера: пожары, взрывы, обрушение здания;
- природного характера: землетрясения, просадка (провал) земной поверхности в результате карста, буря, ураган, ливень, сильные снегопад, мороз, гололед, жара и туман, дождевые паводки;
- биологического характера: инфекционные заболевания человека, эпидемия, пандемия;
- социального характера: массовые беспорядки, терроризм;
- экологического характера: превышение предельно допустимых концентраций вредных примесей в атмосфере.

Наиболее вероятным при проведении расчетов является возникновение пожара в помещении лаборатории. Основные причины возникновения пожара включают в себя неисправность токоведущих частей оборудования, работа с открытой электроаппаратурой, короткое замыкание, несоблюдение правил пожарной безопасности и наличие горючих компонентов.

4.4.2 Мероприятия по предотвращению ЧС

Согласно Федеральному закону от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» помещение лаборатории по степени взрывопожарной опасности относится к пожароопасным (категория В), в котором находятся (обращаются) горючие и

трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы [38].

Мероприятия по пожарной профилактике включают в себя организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т.д., необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудногорючих материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

- правильное размещение оборудования;

- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении пожара необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);

- позвонить в пожарно-спасательную службу или МЧС – тел. 112;

- принять меры по ликвидации пожара и эвакуации персонала.

В ходе работы над разделом «Социальная ответственность» получены следующие результаты»:

- условия труда на рабочем месте исследователя во время проведения нейтронно-физических расчетов характеристик ядерного реактора относятся к категории «допустимые» и регулируются Трудовым кодексом Российской Федерации, Максимальное количество рабочих часов для допустимых условий труда составляет 40 часов в неделю;

- рабочее место должно соответствовать требованиям, описанным в ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ и СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и учитывать физиологические особенности работника;

- меры по защите работника от воздействия вредных и опасных факторов направлены на обеспечение комфортных условий микроклимата и освещенности и снижение воздействия акустических и механических колебаний, электрического тока и электромагнитных излучений;

- влияние эксплуатации ядерного реактора обуславливается образованием радиоактивных отходов и производством больших объемов тепловой энергии;

- наиболее вероятной ЧС во время проведения работ по расчету является пожар. Рабочее помещение классифицируется как пожароопасное.

Заключение

В результате проделанной работы для реактора типа ВВЭР было выполнено следующее:

- в ходе предварительного теплофизического расчета получено значение скорости прокачки теплоносителя $v = 3,549$ м/с, что удовлетворяет установленным требованиям;

- проведен нейтронно-физический расчёт «холодного» состояния реактора и получен коэффициент размножения нейтронов для бесконечной среды $k_{\infty} = 1,4383$, получен эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эф} = 1,4270$;

- проведен нейтронно-физический расчёт «горячего» состояния реактора и получен коэффициент размножения нейтронов для бесконечной среды $k_{\infty} = 1,4028$, получен эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эф} = 1,3908$;

- в ходе расчёта в программе WIMS-D5B, получен коэффициент размножения нейтронов для бесконечной среды $k_{\infty} = 1,4165$ для «холодного» состояния и $k_{\infty} = 1,3784$ для «горячего»;

- в результате теплофизического расчета получены максимальные значения термических напряжений в оболочке $\sigma_{об} = 48,950$ МПа и топливной таблетке $\sigma_{тт} = 7,605$ МПа, что не превышает пределов прочности материалов и удовлетворяет требованиям безопасности;

- Бюджет научно-технического исследования составил 160357,99 рублей. Бюджет НТИ состоит из материальных затрат (1365,00 руб.), амортизационных отчислений (3489,93 руб.), затрат на оплаты труда (73770,30 руб.), оплату страховых взносов (22278,63 руб.) и прочих расходов (10123,61 руб.);

- наиболее вероятной ЧС во время проведения работ по расчету является пожар. Рабочее помещение классифицируется как пожароопасное.

Список использованных источников

1. International Atomic Energy Agency, Nuclear Power Reactors in the World // Reference Data Series. – № 2. – Vienna: IAEA, 2019. – 88 p.
2. Haas R., The Technological and Economic Future of Nuclear Power / Reinhard Haas, Lutz Mez, Amela Ajanovic. // Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH part of Springer Nature, 2019. – 385 p.
3. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта./ С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Украинцев. – М: Логос, 2010. – 604 с.
4. Лебедев В.А., Ядерные энергетические установки: учебное пособие / В.А. Лебедев. – СПб: Издательство «Лань», 2015. – 192 с.
5. Enzo De Sanctis, Energy from Nuclear Fission / Enzo De Sanctis, Stefano Monti, Marco Ripani. – Cham: Springer International Publishing AG, 2016. – 278 p.
6. Nuclear Reactor Systems: A Technical, Historical and Dynamic Approach / Bertrand Barré, Pascal Anzieu, Richarch Lenain, Jean-Baptiste Thomas. – Les Ulis: EDP Sciences, 2016. – 433 p.
7. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие / Бойко В. И., Кошелев Ф. П., Шаманин И. В., Колпаков Г. Н – Томск: Томский политехнический университет, 2015. – 192 с.
8. Palacios A., Hydrogen generation, and its venting from nuclear reactors./ Adriana Palacios, Derek Bradley. // Fire Safety Journal. – 2020. – № 113. – P. 1-7
9. Albert R. Kaufmann, Nuclear Reactor Fuel Elements: Metallurgy and Fabrication / Albert R. Kaufmann. – Geneva: Interscience Publishers, 1962. – 739 p.
10. Joyce M., Nuclear Engineering: A Conceptual Introduction to Nuclear Power / Malcolm Joyce. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. – 420 p.

11. International Atomic Energy Agency, Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data. – Vienna: IAEA, 2008. – 191 p.
12. Групповые константы для расчёта ядерных реакторов / Абагян Л. П., Базазянц Н. О., Бондаренко И. И., Николаев М. Н. – М., Атомиздат, 1964. – 140 с.
13. Zohuri B., Neutronic Analysis For Nuclear Reactor Systems / Bahman Zohuri. – New York: Springer International Publishing, 2017. – 551 p.
14. Мерзликин Г.Я., Основы теории реакторов: [учебник] / Г.Я. Мерзликин. – [Издание 3-е, переработанное и дополненное]. – Севастополь: Издательство Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности, 2011. – 450 с.
15. WIMSD-IAEA Library [Электронный ресурс] / Url: <http://nucleus.iaea.org/CIR/CIR/WIMSDLibrary.pdf> – свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. Дата обращения: 19.05.2020 г.
16. Александров А.А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: справочник / Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 226 с.
17. Пелецкий В.Э., Грищук А.П., Мусаева З.А., Кинетические свойства реакторного сплава Э-110 в области высоких температур / В.Э. Пелецкий, А.П. Грищук, З.А. Мусаева, // ТВТ, 1994. – Т. 32, №6. – С. 820–824
18. Соляный В.И. и др., Исследования анизотропии коэффициента теплового расширения оболочек твэлов из сплава Zr — 1% Nb / В.И. Соляный // Атомная энергия, 1981. – Т. 50, №3. – С. 207–209
19. Черняева Т.П., Стукалов А.И., Грицина В.М., Влияние кислорода на механические свойства циркония / Т.П. Черняева, А.И. Стукалов, В.М. Грицина // Вопросы атомной науки и техники, 2002. – №1. – С. 96–102
20. Черняева Т.П., Грицина В.М. и др., Корреляция между упругостью и другими свойствами циркония / Т.П. Черняева, В.М. Грицина // Вопросы атомной науки и техники, 2009. — № 4. — С. 206-217

21. Булышко Д.Ю., Грабовецкая Г.П., Механические свойства и деформационное поведение циркониевых сплавов Zr-1Nb и Zr-2,5Nb в ультрамелкозернистом состоянии. – «Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки»: Электронный сборник статей по материалам XXVII студенческой международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. – № 12 (26).– С. 69 – 74. – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: [http://www.sibac.info/archive/Technic/12\(26\).pdf](http://www.sibac.info/archive/Technic/12(26).pdf). Дата обращения: 05.04.2020 г.

22. Физическое материаловедение: учеб. пособие. В 3-х частях. Ч. 3. Материалы энергетики и энергосбережения / Федотов А.К., Анищик В.М., Тиванов М.С. – Минск: Высшая школа, 2015. – 463 с.

23. НП-001-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» [Текст]. – Введ. 2016.02.16. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – 56 с.

24. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Учебно-методическое пособие/ И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницына. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

25. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации [текст]: [федер. закон: принят Гос. Думой 21 дек. 2001 г.: по состоянию на 2 фев. 2020 г.]. – М.: Эксмо, 2020. – 224 с.– 5000 экз.

26. О специальной оценке условий труда: Федеральный Закон от 28 декабря 2013 N 426-ФЗ // Российская газета. – 2013. – 30.12. – С. 18

27. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [Текст]. – Введ. 1979-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 9 с.

28. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [Текст]. – Введ. 2003.06.30. – М.: Российская газета, 2003. – 21.06. – 19 с.

29. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Текст]. – Введ. 1996.10.01. – М.: Российская газета, 1996. – 01.10. – 14 с.
30. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [Текст]. – Введ. 2017.05.08. – М.: Минстрой России, 2016. – 102 с.
31. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы [Текст]. – Введ. 1996.10.31. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 22 с.
32. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [Текст]. – Взамен ГОСТ 12.1.003-83, ГОСТ 12.1.023-80; введ. 2015.11.01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 24 с.
33. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности. [Текст]. – Взамен ГОСТ 12.1.006-76; введ. 1986.01.01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 5 с.
34. ГОСТ Р 55241.1-2012. Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 100. Введение в стандарты, относящиеся к эргономике программных средств [Текст]. – Введ. 2013.12.01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 23 с.
35. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [Текст]. – Введ. 1983.07.01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 7 с.
36. СанПин 2.6.1.24-03 Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03) [Текст]. – Введ. 2003.06.20. – М.: Российская газета, 2003. – 20.06. – 17 с.
37. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный Закон от 11 июля 2011 N 190-ФЗ // Российская газета. – 2011. – 15.07. – С. 20

38. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности:
Федеральный Закон от 22 июля 2008 N 123-ФЗ // Российская газета. – 2008. –
01.08. – С. 27

Приложение А

(обязательное)

Таблица А.1 – Макроскопические сечения и замедляющая способность материалов при гетерогенной организации ячейки

Величина	U ²³⁵	U ²³⁸	O (т)	H ₂ O	Zr	Nb	He
$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	0,327	0	0	0	0	0	0
$\Sigma_c, \text{см}^{-1}$	0,077	0,061	0	0,022	0,008	$4,9 \cdot 10^{-4}$	0
$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	0,384	0,045	0	0,022	0,008	$4,9 \cdot 10^{-4}$	0
$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	0,011	0,202	0,174	2,670	0,264	0,003	$1,9 \cdot 10^{-5}$
$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	0,395	0,247	0,167	2,310	0,269	0,003	$1,6 \cdot 10^{-5}$
$\xi \Sigma_s$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	0,002	0,021	1,350	0,006	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$

Таблица А.2 – Макроскопические сечения и замедляющая способность материалов при гомогенной организации ячейки

Величина	U ²³⁵	U ²³⁸	O (т)	H ₂ O	Zr	Nb	He
$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	0,100	0	0	0	0	0	0
$\Sigma_c, \text{см}^{-1}$	0,024	0,019	0	0	0,001	$6 \cdot 10^{-5}$	0
$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	0,117	0,014	0	0,012	0,001	$6 \cdot 10^{-5}$	0
$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	0,004	0,062	0,053	1,438	0,033	0,00034	$6,7 \cdot 10^{-7}$
$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	0,120	0,075	0,051	1,245	0,033	0,00039	$5,5 \cdot 10^{-7}$
$\xi \Sigma_s$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	0,00005	0,006	0,727	0,001	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$

Таблица А.3 – Макроскопические сечения и замедляющая способность материалов при двухзонной организации ячейки

Величина	U ²³⁵	U ²³⁸	O (т)	H ₂ O	Zr	Nb	He
$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	0,216	0	0	0	0	0	0
$\Sigma_c, \text{см}^{-1}$	0,051	0,040	0	0	0,002	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0

Продолжение таблицы А.3

$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	0,254	0,029	0	0,022	0,002	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0
$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	0,008	0,133	0,115	2,67	0,071	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	0,261	0,163	0,110	2,31	0,072	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
$\xi \Sigma_s$	$6,4 \cdot 10^{-5}$	0,001	0,014	1,35	0,002	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-7}$

Приложение Б

(обязательное)

CELL 6

SEQUENCE 1

NGROUP 69

NMESH 71

NMATERIAL 3 1

NREGION 4

PREOUT

INITIATE

***** ** ***** *****

ANNULUS 1 0.07 0 1

ANNULUS 2 0.3765 1 30

ANNULUS 3 0.455 2 10

ANNULUS 4 0.693 3 30

MATERIAL 1,-1,1050.,1,

2235 0.00074199 \$

8238 0.021743 \$

6016 0.044969 \$

MATERIAL 2,-1,625.,2, \$

91 0.04265 \$

93 0.0004216 \$

MATERIAL 3,-1,443.,3 \$

3001 0.0607 \$

6016 0.03035

S 32

MESH 1 30 10 30

POWERC 1,21,2,1

BEGINC

Приложение В

(обязательное)

Таблица В.1 – Значения объемной, линейной и поверхностной плотностей тепловыделения на всех участках

i	$q_{vi}, 10^{-4} \text{ МВт/см}^3$	$q_{li}, 10^{-4} \text{ МВт/см}$	$q_{si}, 10^{-4} \text{ МВт/см}^2$
1	0,34	0,15	0,06
2	1,03	0,46	0,19
3	1,71	0,76	0,32
4	2,37	1,06	0,45
5	3,02	1,34	0,57
6	3,64	1,62	0,69
7	4,24	1,89	0,79
8	4,80	2,14	0,90
9	5,33	2,37	1,00
10	5,81	2,59	1,09
11	6,25	2,78	1,18
12	6,65	2,96	1,25
13	6,99	3,11	1,32
14	7,28	3,24	1,37
15	7,52	3,35	1,42
16	7,70	3,43	1,45
17	7,82	3,48	1,47
18	7,88	3,51	1,48
19	7,88	3,51	1,48
20	7,82	3,48	1,47
21	7,70	3,43	1,45
22	7,52	3,35	1,42
23	7,28	3,24	1,37
24	6,99	3,11	1,32
25	6,65	2,96	1,25
26	6,25	2,78	1,18
27	5,81	2,59	1,09

Продолжение таблицы В.1

28	5,33	2,37	1,00
29	4,80	2,14	0,90
30	4,24	1,89	0,79
31	3,64	1,62	0,69
32	3,02	1,34	0,57
33	2,37	1,06	0,45
34	1,71	0,76	0,32
35	1,03	0,46	0,19
36	0,34	0,15	0,06

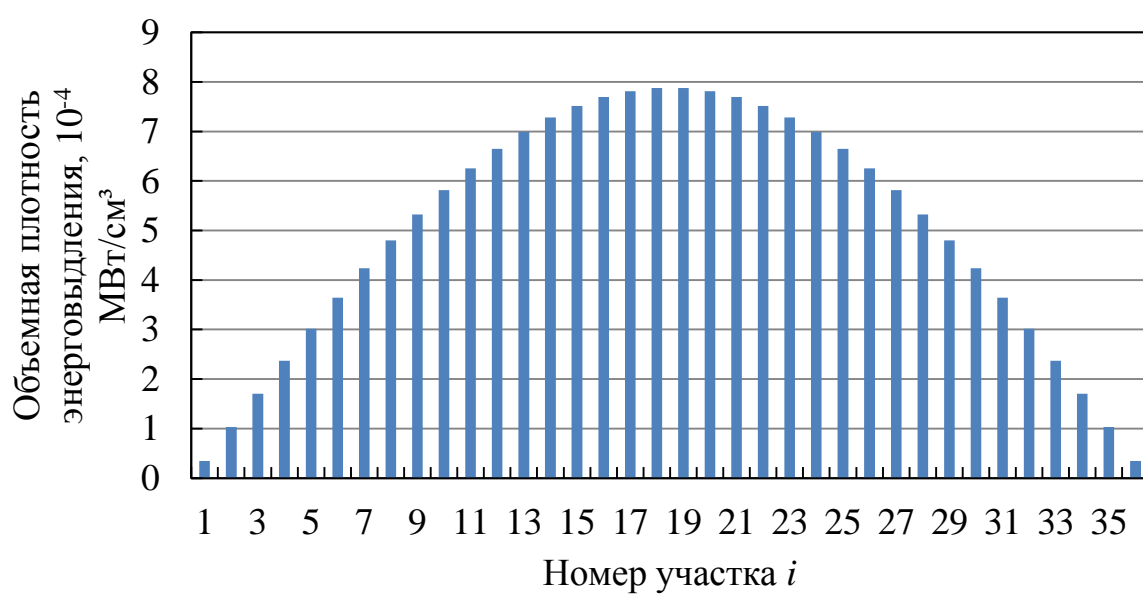


Рисунок В.1 – Распределение объемной плотности энерговыделения по длине топливного канала

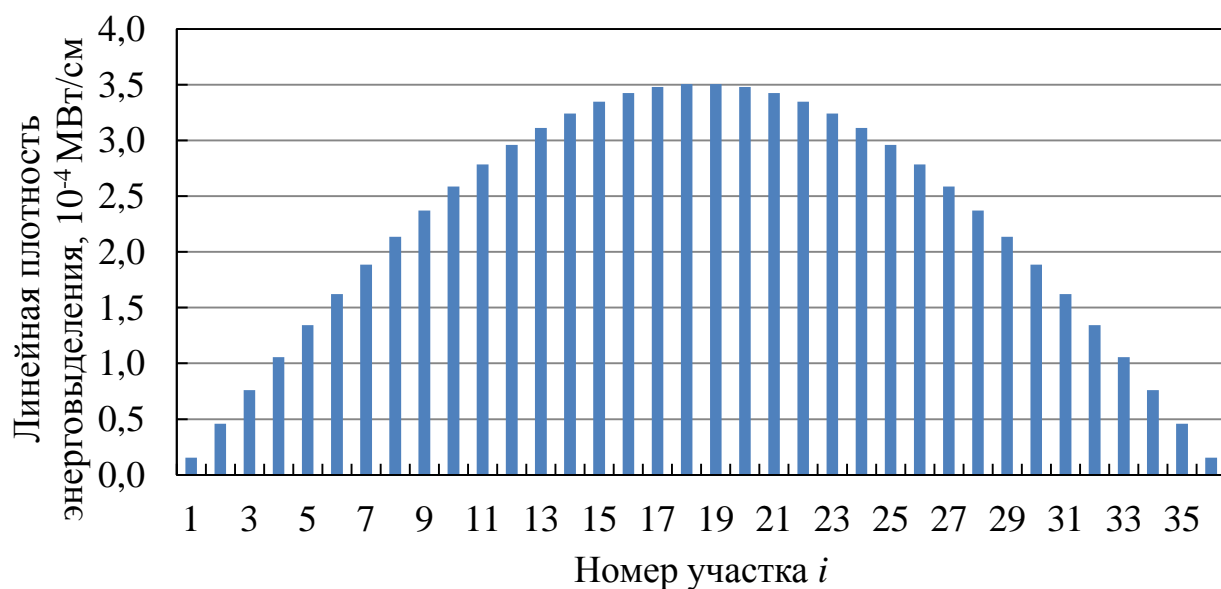


Рисунок В.2 – Распределение линейной плотности энерговыделения по длине топливного канала

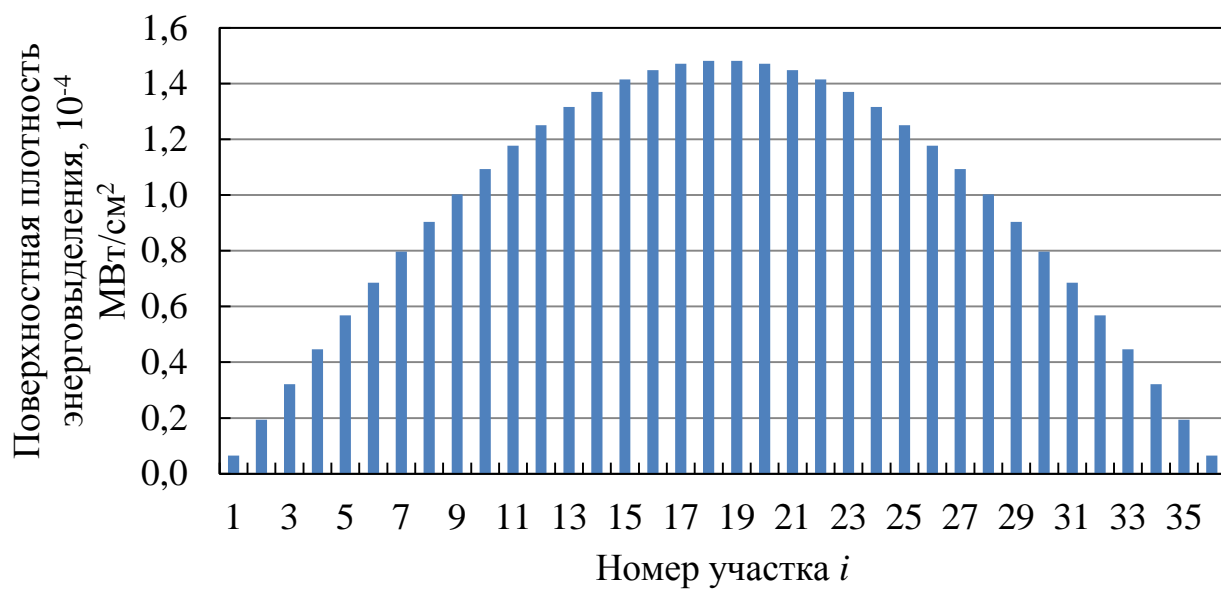


Рисунок В.3 – Распределение поверхностной плотности энерговыделения по длине топливного канала

Приложение Г

(обязательное)

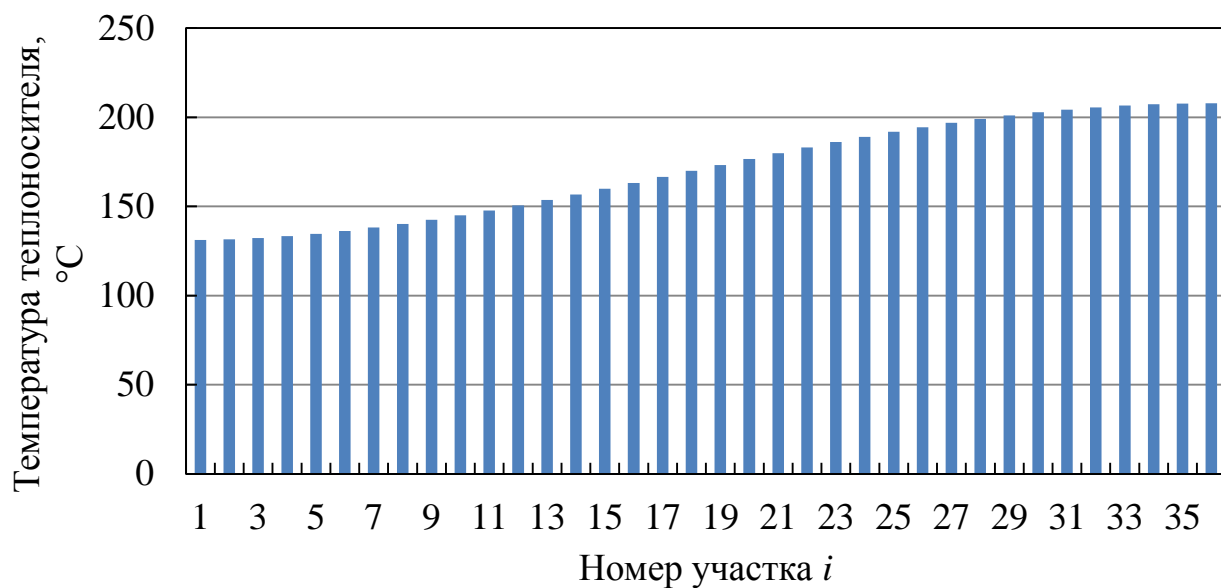


Рисунок Г.1 – Распределение температуры теплоносителя по длине топливного канала

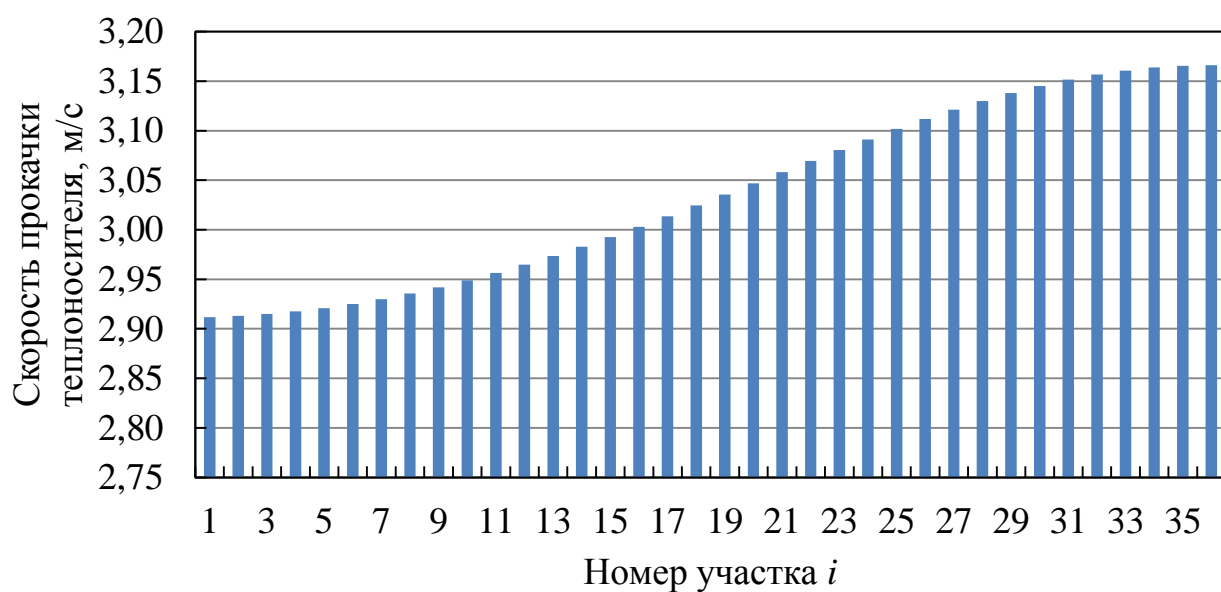


Рисунок Г.2 – Распределение скорости прокачки теплоносителя по длине топливного канала

Приложение Д

(обязательное)

Таблица Д.1 – Результаты расчета критерия Нуссельта

i	$\nu_i, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda_i, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\alpha_i, 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	Re_i	Pr_i	Nu_i
1	2,149	0,69419	1,7440	144577	1,3086	98,725
2	2,275	0,69422	1,7445	145097	1,3040	98,833
3	2,263	0,69428	1,7452	145963	1,2966	99,017
4	2,246	0,69434	1,7462	147166	1,2864	99,270
5	2,226	0,69440	1,7474	148701	1,2738	99,596
6	2,202	0,69446	1,7488	150546	1,2589	99,982
7	2,174	0,69448	1,7504	152699	1,2421	100,432
8	2,144	0,69447	1,7521	155131	1,2238	100,938
9	2,112	0,69441	1,7538	157834	1,2043	101,499
10	2,078	0,69427	1,7555	160782	1,1839	102,108
11	2,043	0,69406	1,7571	163947	1,1629	102,756
12	2,008	0,69374	1,7586	167301	1,1418	103,442
13	1,972	0,69332	1,7600	170833	1,1207	104,163
14	1,937	0,69279	1,7611	174508	1,0998	104,907
15	1,902	0,69214	1,7620	178283	1,0795	105,671
16	1,869	0,69136	1,7626	182139	1,0599	106,450
17	1,835	0,69046	1,7628	186044	1,0412	107,239
18	1,804	0,68945	1,7628	189979	1,0234	108,034
19	1,774	0,68832	1,7624	193892	1,0066	108,822
20	1,746	0,68710	1,7617	197754	0,9910	109,601
21	1,719	0,68580	1,7607	201564	0,9764	110,373
22	1,695	0,68443	1,7594	205253	0,9631	111,121
23	1,672	0,68301	1,7579	208825	0,9509	111,848
24	1,650	0,68156	1,7561	212249	0,9398	112,549
25	1,631	0,68011	1,7542	215487	0,9298	113,213
26	1,614	0,67869	1,7521	218534	0,9209	113,842
27	1,598	0,67730	1,7500	221352	0,9131	114,426
28	1,584	0,67599	1,7479	223920	0,9062	114,960
29	1,572	0,67476	1,7459	226235	0,9003	115,444

Продолжение таблицы Д.1

30	1,561	0,67365	1,7440	228280	0,8952	115,873
31	1,553	0,67267	1,7423	230020	0,8911	116,239
32	1,545	0,67185	1,7408	231477	0,8877	116,548
33	1,540	0,67119	1,7396	232603	0,8851	116,786
34	1,536	0,67071	1,7387	233425	0,8833	116,961
35	1,533	0,67042	1,7382	233917	0,8822	117,066
36	1,533	0,67032	1,7380	234093	0,8819	117,105

Таблица Д.2 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи

i	$a_0^i, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	ε_{zi}	ε_{qi}	$a_i, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
1	6048,147	1	2,359761	14272,180
2	6055,048	1	1,226627	7427,284
3	6066,855	1	1,135976	6891,803
4	6082,903	1	1,097126	6673,710
5	6103,382	1	1,075542	6564,445
6	6127,556	1	1,061807	6506,284
7	6155,304	1	1,052298	6477,218
8	6186,242	1	1,045325	6466,636
9	6220,105	1	1,039993	6468,866
10	6256,149	1	1,035783	6480,014
11	6293,939	1	1,032375	6497,707
12	6333,072	1	1,029560	6520,277
13	6373,316	1	1,027195	6546,639
14	6413,962	1	1,025181	6575,471
15	6454,581	1	1,023444	6605,903
16	6494,825	1	1,021932	6637,267
17	6534,452	1	1,020602	6669,077
18	6573,277	1	1,019425	6700,964
19	6610,351	1	1,018375	6731,817
20	6645,879	1	1,017433	6761,736
21	6680,068	1	1,016582	6790,840
22	6711,854	1	1,015811	6817,976

Продолжение таблицы Д.2

23	6741,787	1	1,015108	6843,645
24	6769,611	1	1,014466	6867,538
25	6795,087	1	1,013875	6889,369
26	6818,575	1	1,013331	6909,473
27	6839,510	1	1,012828	6927,247
28	6858,115	1	1,012361	6942,892
29	6874,463	1	1,011928	6956,460
30	6888,688	1	1,011523	6968,070
31	6900,394	1	1,011146	6977,303
32	6910,299	1	1,010792	6984,873
33	6917,603	1	1,010460	6989,959
34	6923,014	1	1,010147	6993,265
35	6926,227	1	1,009853	6994,473
36	6927,475	1	1,009576	6993,811

Приложение Е

(обязательное)

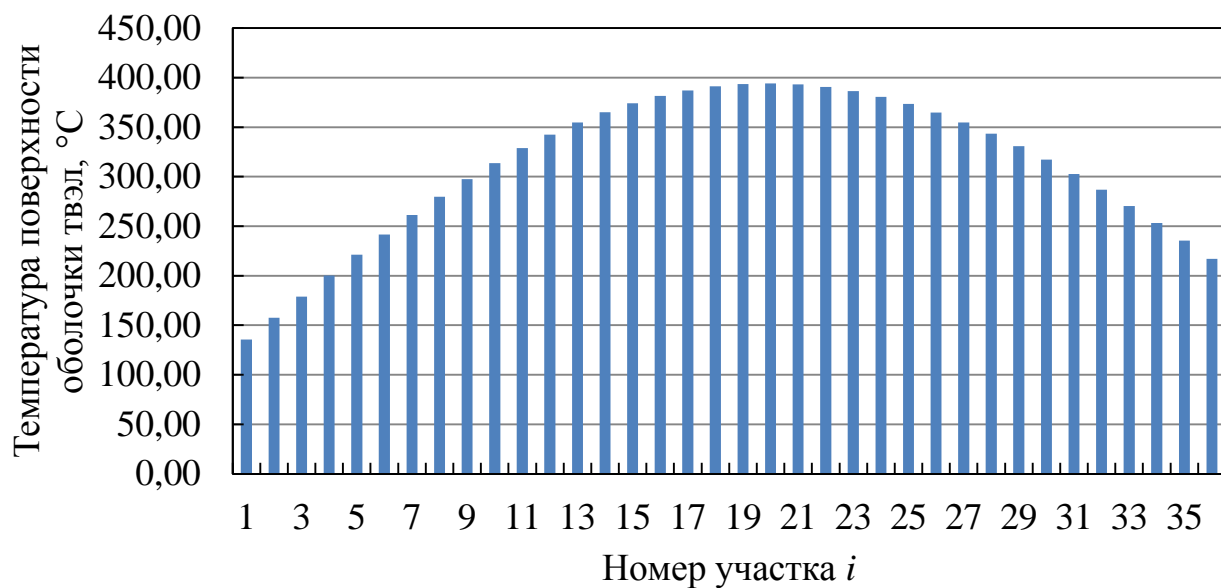


Рисунок Е.1 – Распределение температуры поверхности ТВЭЛ по длине топливного канала

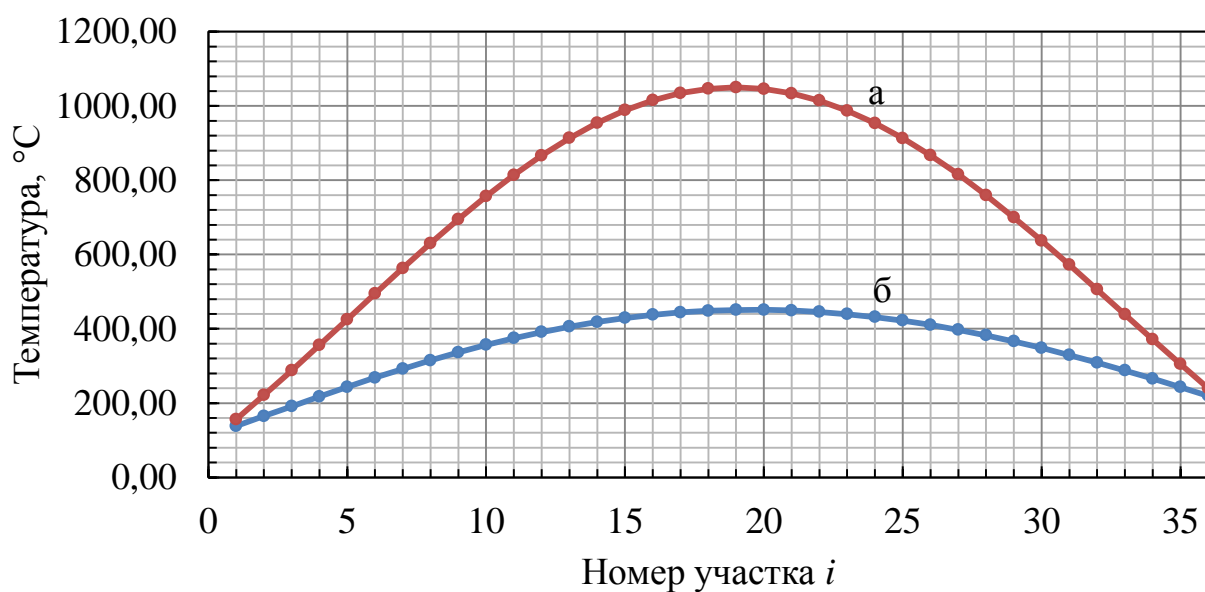


Рисунок Е.2 – Распределение температуры топливной таблетки по длине топливного канала: а – центр; б – поверхность

Приложение Ж

(обязательное)

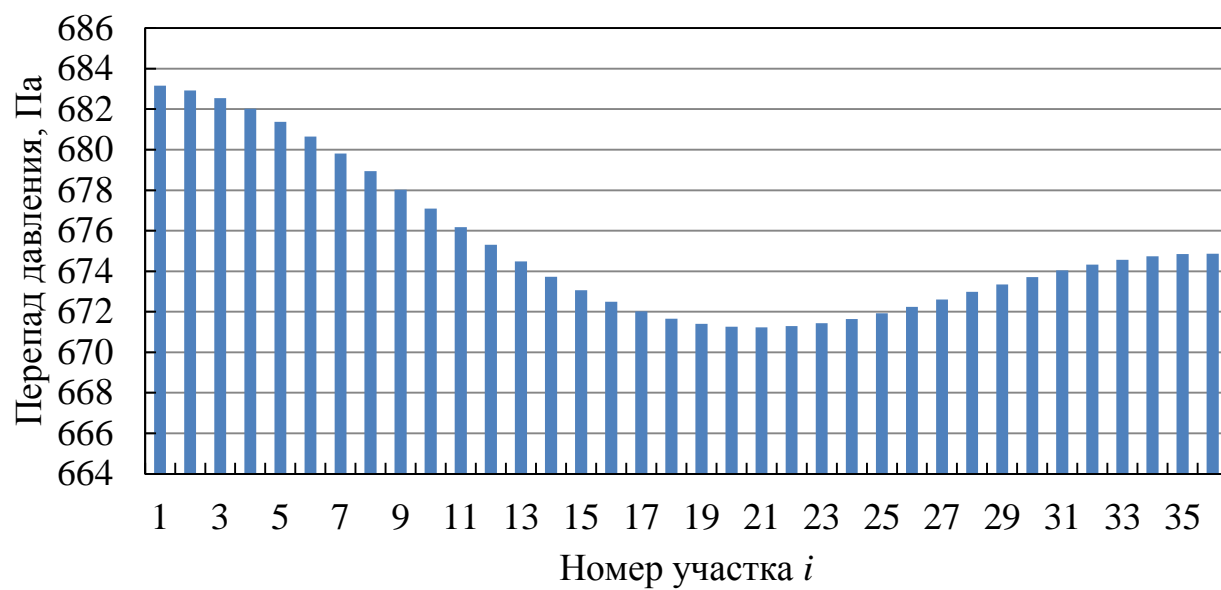


Рисунок Ж.1 – Распределение перепада давления по длине топливного канала

Приложение 3

(обязательное)

Таблица 3.1 – Трудозатраты на выполнение проекта


Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Постановка задачи	НР	1	2	1,40	1,61	0	1,95	0
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,40	2,76	0,28	3,35	0,34
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	3	6	4,20	1,45	4,83	1,76	5,85
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,40	1,61	0,16	1,95	0,19
Обсуждение литературы	НР, И	1	2	1,40	0,32	1,61	0,58	1,95
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	2	4	2,80	3,22	2,25	3,90	2,73
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	3	6	4,2	4,83	3,86	5,85	4,68
Расчет принципиальной схемы устройства	И	4	10	6,40	0	7,36	0	8,92
Оформление расчетно- пояснительной записки	И	2	3	2,40	0	2,76	0	3,35
Оформление графического материала	И	1	2	1,40	0	1,61	0	1,95
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,40	0,97	1,61	1,18	1,95
Итого:				29,40	16,93	26,33	20,52	31,91

Приложение И

(обязательное)

Таблица И.1 – Линейный график работы

Этап	НР	И	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42
1	1,95	0														
2	3,35	0,34														
3	1,76	5,85														
4	1,95	0,19														
5	0,58	1,95														
6	3,90	2,73														
7	5,85	4,68														
8	0	8,92														
9	0	3,35														
10	0	1,95														
11	1,18	1,95														

НР – ; И – 